

Федеральное агентство по образованию  
Уральский государственный технический университет – УПИ имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина

Ю.Н. Логинов В.В. Котов

ПРОЯВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ  
АЛЬФА-СПЛАВОВ ТИТАНА

Учебное пособие

Научный редактор – проф., канд. техн. наук В. В. Шимов

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
УГТУ-УПИ от 26.05.09 года.*

Екатеринбург

УГТУ-УПИ

2009

УДК 621.7:669.295(075.8)

ББК 34.62я73

Л69

Рецензенты:

кафедра механики Российского государственного профессионально-педагогического университета (зам. директора канд. физ.-мат. наук А.В. Песков); ст. науч. сотр., канд. техн. наук Б.И. Каменецкий (Институт физики металлов УрО РАН)

**Ю.Н. Логинов, В.В. Котов**

Л69 Проявления анизотропии в процессах деформации альфа-сплавов титана: учебное пособие / Ю.Н. Логинов, В.В. Котов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 189 с.

ISBN 978-5-321-011628-2

Приведены сведения о проявлении анизотропии в процессах деформации альфа-сплавов титана. В том числе описаны свойства альфа-сплавов титана приведена система уравнений теории пластического течения Хилла для анизотропного материала с изотропным упрочнением, выполнены тензорные преобразования в системе уравнений пластического течения для металлов с ГПУ-решеткой, описаны методы изучения текстурованного состояния альфа-сплавов титана, изложена патентная информация в области обработки альфа-сплавов на основе титана. Предназначено для студентов всех форм обучения направления 150100 – Металлургия профиля 150106 – Обработка металлов давлением, а также слушателей ФПК.

Библиогр.: 89 назв. Табл. 22. Рис. 88. Прил. 52

УДК 621.7:669.295(075.8)

ББК 34.62я73

ISBN 978-5-321-011628-2

© УГТУ-УПИ, 2009

© Авторы, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 5  |
| 1. ОСОБЕННОСТИ ТЕКСТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ С ГПУ РЕШЕТКОЙ.....                                | 6  |
| 1.1. Описания проявления анизотропии в металлах с ГПУ решеткой.....                             | 6  |
| 1.2. Методы определения параметров, характеризующих анизотропию в титановых сплавах.....        | 12 |
| 1.3. Положения теории деформации изотропных и анизотропных материалов.....                      | 16 |
| 1.4. Современные конечно-разностные методы решения краевых задач, реализованные на ЭВМ.....     | 19 |
| 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА .....                           | 28 |
| 2.1. Оценка анизотропных свойств путем определения стандартных механических характеристик ..... | 28 |
| 2.2. Исследование текстуры металла рентгенографическим методом.....                             | 37 |
| 2.3. Исследование микроструктуры трубы.....   | 41 |
| 2.4. Анализ деформированного состояния образцов при осадке в различных направлениях.....        | 47 |
| 2.5. Анализ напряженного состояния образцов при осадке в различных направлениях.....            | 53 |
| 3. ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ С ГПУ РЕШЕТКОЙ .....                     | 56 |
| 3.1. Преобразование девиатора напряжений при развороте системы координат для ГПУ решетки.....   | 56 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.2. Преобразование уравнения пластичности теории Хилла для анизотропных материалов с ГПУ решеткой.....                       | 62  |
| 3.3. Применение упрощенных уравнений теории Хилла для частных случаев ОМД.....  | 68  |
| 3.4. Описание взаимосвязи деформированного состояния и параметров Кернса.....   | 74  |
| 3.5. Описание программы для определения параметров Кернса из обратных полюсных фигур.....                                     | 78  |
| 3.6. Способ определения параметров Кернса по измерению микротвердости.....  | 84  |
| 4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТУРЫ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ.....   | 98  |
| 4.1. Описание постановки задачи прессования в системе DEFORM-3D.....  | 99  |
| 4.2. Моделирование процессов прессования трубных заготовок с известной текстурой.....   | 106 |
| 4.3. Построение плана полнофакторного эксперимента и проведение вычислительного эксперимента с варьированием параметров ..... | 115 |
| 4.4. Зависимость между параметрами текстуры и параметрами прессования.....  | 117 |
| Библиографический список.....   | 124 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....   | 136 |

## ВВЕДЕНИЕ

Титан является одним из самых распространенных материалов в земной коре. Именно уникальный комплекс свойств сплавов, выполненных на его основе, сочетающих малую плотность, высокую прочность и коррозионную стойкость, определил области его применения. Основными потребителями изделий из титановых сплавов являются авиационная и космическая промышленность, военно-морской флот, медицина и химическая промышленность. В последнее время все больший интерес к этим материалам проявляют автомобилестроители.

Среди всего многообразия титановых сплавов особое место занимают сплавы на основе альфа-фазы (альфа- и псевдо-альфа) вследствие особенностей гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решетки, имеющей выраженную анизотропию свойств. Именно распределение ГПУ кристаллитов в изделии, называемое кристаллографической текстурой, позволяет создать особые свойства, недостижимые для изотропных металлов. Поэтому за последние 20 лет началось интенсивное изучение этого явления, появились первые стандарты, требующие создания в изделиях различных видов текстур с определенным комплексом анизотропных свойств. В ряде отраслей промышленности созданы схемы деформации для формирования требуемых текстур. Заложены основы теории деформации анизотропных металлов.

Описанию особенностей свойств и режимов пластической деформации альфа-сплавов титана посвящено данное пособие.

# 1. ОСОБЕННОСТИ ТЕКСТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ С ГПУ РЕШЕТКОЙ

## 1.1. Описание проявления анизотропии в металлах с ГПУ решеткой

Материалы с гексагональной плотноупакованной решеткой, такие как титан, цирконий, магний, цинк и их сплавы имеют ограниченное число плоскостей скольжения и как следствие обладают анизотропией свойств [1]. Как следует из обширного обзора, представленного K. Linga Murty и Indrajit Charit из университета Северной Каролины, США [1] со ссылкой на работы I.L. Dillamore, W.T. Roberts [2] в таких металлах развиваются предпочтительные ориентации кристаллитов во время процесса производства, включающего в себя различные виды термомеханической обработки. Во время пластической деформации кристаллографические оси кристаллитов поворачиваются по направлениям предпочтительных ориентаций, что и приводит к образованию текстуры деформации. По мнению тех же авторов текстура является важным параметром по двум причинам: во-первых, она отвечает за пластичность металла. Во-вторых, текстура конечного изделия оказывает значительное влияние на его потребительские свойства, такие как пределы прочности (временное сопротивление разрыву) и ползучести, коррозионную стойкость и характеристики усталости, что подтверждается работами R.G. Ballinger [3] и E. Tenckhoff [4]. Поэтому изучение текстуры материала является одним из главных условий достижения необходимых свойств изделий и формирования заданного расположения кристаллитов [5, 6].

Интенсивное использование циркония как конструкционного материала началось в начале 50-х годов, когда адмирал H.G. Resover принял решение об использовании этого материала в водоохлаждаемом атомном реакторе подводной лодки «Наутилус» [1]. Однако, чистый цирконий не получил широкого распространения в ядерной промышленности вследствие большого коэффициента поглощения нейтронов и низкой коррозионной стойкости. Вследствие этого началась работа по созданию большого числа циркониевых сплавов.

В настоящее время циркониевые сплавы интенсивно используются в различных типах ядерных реакторов деления, работающих как на тяжелой, так и на легкой воде для различных отраслей промышленного и военного комплекса. Основными изделиями из циркониевых сплавов являются тонкостенные трубы, предназначенные для обкладки ядерных стержней, для создания сеток и каналов в реакторах на кипящей воде (BWR), а также более толстостенные трубы, работающие под давлением в ядерных

реакторах с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением (PHWR) [1].

Исследованием и формированием текстур в трубах начали заниматься с начала 70-х годов, когда атомная индустрия начала требовать циркониевые трубы с улучшенными характеристиками. К этому времени было экспериментально доказано, что формирование различных типов текстуры в трубах приводит к изменению их пластических и прочностных свойств. Таким образом, были сделаны попытки улучшения различных эксплуатационных показателей, путем создания в циркониевых трубах определенной текстуры.

В трубах из ГПУ металла существуют три характерные вида кристаллографической текстуры: радиальная, тангенциальная и продольная (аксиальная) [7-8].

Получение в циркониевых трубах радиальной и аксиальной текстуры приводило к уменьшению эффекта удлинения труб под воздействием радиации и увеличивало жизненный цикл изделия [8]. Wesley Gordon Nilson [8] предложил получать циркониевые трубы способом деформации, при котором уменьшается толщина стенки, и в то же время увеличивается диаметр трубы. В частности, после получения труб холодной прокаткой, следует проводить механическую или гидравлическую раздачу труб. Вторым способом получения радиальной и аксиальной текстуры в трубах, предложенным в патенте [8], является получение сварных труб. Лист циркония прокатывается в холодном состоянии для уменьшения толщины, при этом боковые концы листа фиксируют от уширения. В результате нормали к базисным плоскостям кристаллитов располагаются вдоль листа и перпендикулярно ему. Затем полученный лист режут на штрипсы, которые сворачивают и сваривают, в результате в полученных трубах оказывается радиальная и аксиальная текстура.

Еще один способ получения радиальной текстуры в циркониевых трубах, связанный с раздачей, описан в патенте [9]. Авторы предлагают производство двухслойных циркониевых труб, причем внутренняя труба имеет вначале меньший наружный диаметр, чем внутренний диаметр наружной трубы. При помещении одной трубы в другую, внутренняя – раздается механически, до плотного контакта ее с наружной. Таким образом, получают двухслойную трубу с внутренним слоем, имеющим радиальную ориентацию кристаллитов (текстуру).

Согласно патенту [10], еще одним методом влияния на текстуру является способ получения промежуточной заготовки. Кристаллографическая текстура прессованной заготовки является функцией от параметров прессования: температуры, формы матрицы, микроструктуры шашки, и величины вытяжки. Предложенные в патенте [10] режимы вытяжек и последующей холодной деформации позволяют получать циркониевые трубы с радиальной и тангенциальной текстурой.

В 80-е годы потребность в трубах для топливных элементов возрастала, но возрастали также и требования к их свойствам и сроку службы. Было выяснено [11], что к улучшению свойств в трубах из циркониевых сплавов приводит формирование выраженной радиальной текстуры. В патентах [11] и [12] предложено получать циркониевые трубы холодной прокаткой. При прокатке с предложенными в [11] и [12] обжатами происходит формирование радиальной текстуры.

Текстура измеряется при помощи параметров Кернса –  $f_i$ . Параметр Кернса показывает, какая часть всех базовых плоскостей кристаллитов, имеющих в металле, ориентирована в одном из трех направлений в трубе: радиальном ( $f_r$ ), тангенциальном ( $f_\phi$ ), и продольном или аксиальном ( $f_z$ ). Сумма всех трех параметров равна  $f_r + f_\phi + f_z = 1$ , т.е. для полностью изотропного металла параметры Кернса  $f_r = f_\phi = f_z = 0,33$ .

При использовании ХПТ происходит увеличение  $f_r$ , однако для получения выраженной радиальной текстуры перед последней прокаткой [12], или после нее [11] предложено применить раздачу трубы. В результате раздачи можно достичь текстуры с показателем Кернса  $f_r = 0,65$ .

Получение радиальной текстуры в циркониевых трубах раздачей описано также в патенте [13]. Предлагается получать прессованием заготовку, имеющую меньший диаметр, чем диаметр готовой трубы и затем применять раздачу путем поперечной прокатки или в результате внутреннего давления, вызванного, в частности, взрывом. В результате поперечной прокатки за один этап получено увеличение показателя Кернса  $f_r$  с 0,30 до 0,47. Предлагается осуществлять раздачу в три этапа с промежуточными рекристаллизационными отжигами между ними.

В некоторых случаях для циркониевых труб важно не иметь строго выраженную текстуру, а получить неупорядоченную текстуру, когда  $f_r = f_\phi = f_z \approx 0,33$ . Это связано с малым значением  $f_z$ , получаемым при стандартном способе получения труб – ХПТ. В трубах, используемых в реакторах, необходимо предотвратить продольное удлинение при их радиоактивном облучении. Относительно высокое значение  $f_z$  способствует этому и увеличивает срок жизни труб [14] и [15]. Способом для получения неупорядоченной текстуры является осуществление фазового перехода из  $\alpha$ -фазы циркония с ГПУ решеткой, в  $\beta$ -фазу с ОЦК решеткой с выдержкой в  $\beta$ -области. При этом переходе происходит полное разупорядочение текстуры. Дальнейшее охлаждение ниже ТПП приводит к образованию  $\alpha$ -сплава циркония с неупорядоченной текстурой [14], [15]. В патенте [14] такую термообработку предложено осуществлять для труб, в патенте [15] – для штрипсов, из которых в дальнейшем изготавливают сварные трубы.

Для листов из циркониевых сплавов характерен один и тот же тип текстуры. Согласно [1], вследствие того, что нормали к базисным плоскостям преимущественно ориентируются параллельно направлению



усилия сжатия со стороны валков при холодной прокатке, эти нормали направлены параллельно направлению толщины листа (направлению нормали: НН), с небольшим отклонением в пределах  $\pm 30^\circ$  в направлении толщины листа (поперечного направления: ПН) (рис. 1.1). На этом рисунке нормаль к базисной плоскости с показана направлением  $[0002]$ .

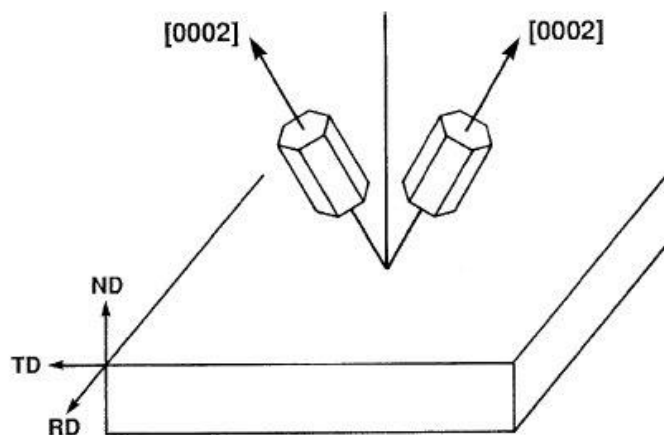


Рис. 1.1. Ориентация кристаллитов в холоднокатаных листах из циркониевых сплавов: RD – направление прокатки, TD – поперечное направление, ND – направление нормали [1]

При волочении круглой проволоки происходит концентрическое сжатие металла, приводящее к уменьшению диаметра и ее удлинению. Такой процесс [16] приводит к получению в циркониевых сплавах радиально-тангенциальной текстуры с ориентацией нормалей к базисным плоскостям кристаллитов перпендикулярно аксиальному направлению в проволоке (рис. 1.2).

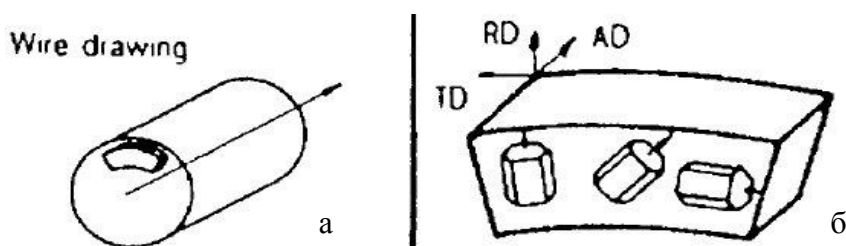


Рис. 1.2. Формирование текстуры в циркониевых сплавах при волочении: а – положение темплета в проволоке; б – расположение кристаллитов в темплете: RD – радиальное направление, TD – тангенциальное направление, AD – продольное (аксиальное) направление [16]

В настоящее время среди альфа-титановых сплавов наибольшее распространение получил сплав Grade 9 (Ti-3Al-2,5V), активно применяемый в трубном производстве. Это объясняется возможностью достижения в сплаве уникального комплекса свойств. Этот сплав может быть подвергнут обычной при производстве труб холодной обработке, его

можно сваривать, и его прочность может быть увеличена путем комбинации холодной обработки и последующей термообработки в широком диапазоне значений прочности и пластичности [7].

Применение труб и изделий из труб, выполненных из титанового сплава Ti-3Al-2,5V, стало общепринятым в гражданском и военном самолетостроении. Начиная от гражданских самолетов, таких как Боинг 747, 757 или 767 и Аэробус А-320, и до самых высокоэффективных военных самолетов, подобных Саабз Джас 39 и F-14, титановые трубы из этого сплава находятся в постоянном использовании. В системах, рассчитанных на давление 20,7, 27,6, 34,5 и 55,2 МПа, титановый сплав Ti-3Al-2,5V применяется в гидравлических трубопроводах [7].

Начиная с 70-х годов, началось интенсивное исследование текстуры, формируемой в трубах и ее влияния на свойства. Это привело к созданию в середине 80-х годов стандартов на холоднокатаные трубы, в которых указывался тип необходимой текстуры.

Для холоднокатаных труб из сплава Grade 9 характерны два однокомпонентных вида текстуры: радиальная и тангенциальная, а также двухкомпонентная радиально-тангенциальная.

Согласно [7] текстура трубы в радиально-тангенциальной плоскости может быть, как показано на рис. 1.3, в значительной степени изменена при варьировании характера обжатия в холодном состоянии. Если применяется сильное обжатие по толщине стенок, трубы будут содержать большее количество кристаллов, имеющих базисные полюса вблизи радиального направления. Если обжатие происходит главным образом по диаметру трубы, кристаллы имеют тенденцию к окружной (тангенциальной) ориентации вокруг трубы.

В англоязычной литературе [1, 7, 17, 18] введен параметр  $Q = \frac{\ln \varepsilon_{rr}}{\ln \varepsilon_{\phi\phi}}$ ,

как отношение обжатия по толщине стенок к обжатию по диаметру. При обжатии трубы со значениями  $Q > 1$  в трубе формируется радиальная текстура, при  $Q < 1$  – тангенциальная текстура, при  $Q = 1$  – радиально-тангенциальная [7,19]. В работах [19,20] приведены рекомендации по изготовлению инструмента и маршрутам холодной прокатки труб с разными значениями  $Q$ .

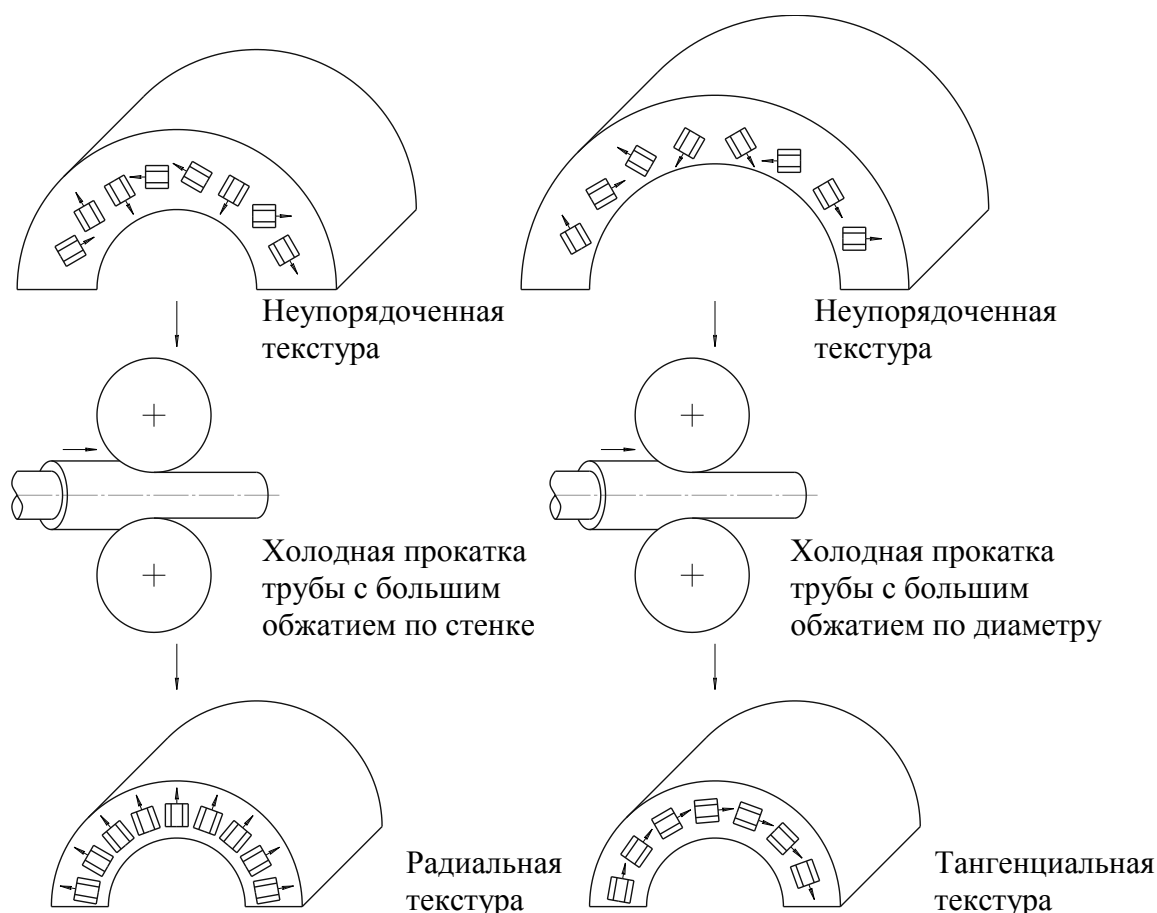


Рис. 1.3. Формирование текстуры в трубах из титанового сплава Grade 9 холодной прокаткой [7]

В патентах [21] и [22] предложено получение сварных труб из коррозионно-стойкого сплава Grade 9 с созданием в них радиальной текстуры. Штрипс сворачивают и сваривают, а затем полученную трубную заготовку прокатывают на станах ХПТ с обжатием по стенке не менее 50% и уменьшением диаметра внутреннего отверстия также не менее чем на 50%. В результате этих операций получается готовая труба с радиальной текстурой.

В работах [7,23,24] показано влияние различных типов кристаллографической текстуры на свойства труб из титанового сплава Grade 9.

Радиальная текстура приводит к увеличению предела выносливости, повышает пластичность на изгиб.

Тангенциальная текстура улучшает пластические свойства на раздачу. Такую трубу можно отфланцевать на 90° к оси или расширить для необходимых соединений без образования трещин.

Активными исследованиями в области текстуры титановых сплавов в том числе и Grade 9 в России занимались С.Я. Бецофен, Б.А. Колачев,

Л.А. Бунин, В.А. Володин, Е.Б. Рубина и их коллеги [25-28]. В работе [28] показано, что при холодной прокатке листов из сплава Ti-3Al-2,5V в них образуется базисная текстура (нормали к базисной плоскости кристаллита ориентированы в направлении толщины листа). При увеличении величины обжатия уменьшается призматическая (нормали к базисной плоскости кристаллитов ориентированы перпендикулярно направлению толщины листа) и увеличивается базисная текстура. Более высоких значений последней можно достичь при применении поперечной прокатки.

## 1.2. Методы определения параметров, характеризующих анизотропию в альфа-титановых сплавах

Наиболее распространенным методом изучения кристаллографических текстур является построение полюсных фигур, где дифракция рентгеновских лучей используется для определения ориентаций кристаллографических плоскостей с использованием кристаллографической проекции [1, 29, 30]. Существуют две разновидности полюсных фигур – прямые (ППФ) и обратные (ОПФ). Эти полюсные фигуры являются количественными показателями, и поэтому широко применяются различные числовые показатели, такие как коэффициент текстуры, параметры Кернса (Kearns  $f$ -factor) и Каэлстрема (Kallstrom  $F$ -parameter) [1].

В 1965 г. Кернс [31, 32] предложил параметр ориентаций  $f$ , определяемый на основе фактической доли зерен (кристаллитов) с ориентацией нормали к базовой плоскости в определенном направлении. Этот параметр можно определить по формуле [1, 33]:

$$f = \int_0^{\pi/2} I_{\phi} \sin(\phi) \cdot \cos^2(\phi) d\phi, \quad (1.1)$$

где  $I_{\phi} \sin(\phi)$  – объемная доля кристаллитов с ориентировкой  $c$ -оси (нормали к базовой плоскости), отклоненной на угол  $\phi$  от выбранного направления. Значение  $f$  можно определить как из прямых, так и из обратных полюсных фигур, но из вторых – гораздо проще. Наиболее часто параметры Кернса вычисляют для трех ортогональных направлений (направление прокатки – НП, направление нормали – НН, поперечное направление – ПН для листа или  $r$ ,  $\phi$ ,  $z$  для трубы), причем  $f_r + f_{\phi} + f_z = 1$ .

Как видно из уравнения (1.1) для расчета параметров необходимо применить процедуру численного интегрирования с предварительной обработкой полюсных фигур, что является весьма трудоемким процессом.

Однако необходимо отметить, что существует допущение о том, что каждая определяемая плоскость оси кристаллита равномерно распределена вокруг оси  $c$  (нормали к базовой плоскости). Если существует предпочтительная ориентация этих плоскостей по отношению к

поверхности образца, то это приведет к ошибке в определении  $f$ -параметра [1].

В 1972 г. Каэлстром (K Kallstrom) [34] предложил для количественной оценки данных рентгеновского анализа другой показатель, который можно легко определить из прямых полюсных фигур:

$$F = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{\phi} \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) d\phi. \quad (1.2)$$

Создание этих двух показателей позволило значительно упростить интерпретацию результатов рентгеновского исследования и использовать их количественные характеристики для анализа процессов обработки металлов давлением. В настоящее время этот метод контроля кристаллографической текстуры входит в стандарт на цельнотянутые титановые трубы из сплава Grade 9 для аэрокосмической промышленности AMS 4946 [35].

Дальнейшим развитием дифракционного анализа согласно патенту [36] является его проведение непосредственно на трубе, как метода неразрушающего контроля.

Еще одним методом по определению кристаллографической текстуры ГПУ материалов является определение показателя ориентации гидридов  $F_n$  [31]. Эта величина определяется как доля следов гидридов, имеющих ориентацию в пределах определенного угла от выбранного направления [37].

В статье [37] этот параметр определяли в трубах из циркониевого сплава Zircaloy-4 в соответствии со стандартом ASTM B-353 [38]. Для этого образцы, вырезанные из стенки труб, насыщали водородом при температуре 350°C и в течение времени от 1 до 15 ч, в зависимости от толщины образца (0,4–9 мм). Поверхность насыщенных образцов подвергали операциям полировки и травления в растворе азотной и плавиковой кислот, осветления для увеличения контраста гидридов.

После этого образцы наблюдали в оптический микроскоп и записывали микрофотографии при 400 кратном увеличении. Согласно [38] на основе полученных фотографий по методике «Soft Imaging System GmbH Analysis» были определены показатели ориентации гидридов  $F_n$ .

В результате получены уравнения связи между этим коэффициентом и параметрами Кернса для трубной заготовки из циркониевого сплава Zircaloy - 4:

$$F_n = -2,5049(f_r)^2 + 2,0754(f_r) - 0,1237,$$

$$F_n = -2,5732(f_{\phi})^2 + 2,888(f_{\phi}) - 0,4989.$$

Аналогичный метод испытаний применяется и для альфа- и псевдо альфа- сплавов титана.

Вышеописанные методы являются по своей сути металлографическими способами определения текстуры металла. Однако для труб разрабатывали и косвенные методы оценки текстуры, основанные на зависимости свойств металла от текстуры.

Одним из самых распространенных таких методов является определение параметра отношения деформаций укорочения (contractile strain ratio – CSR) в соответствии со стандартом AS 4076 [39].

Для испытания из трубы в соответствии со стандартом ASTM E8 [40] вырезают образец трубчатой формы. Центральный участок трубы покрывают слоем чернил, поверх которых иголкой или пером наносят масштабные линии в двух направлениях: вдоль оси трубы и поперек нее (рис. 1.4). Точки пересечения масштабных линий маркируются для удобства дальнейших измерений.

Перед началом эксперимента производится измерение размеров исследуемого образца: диаметра трубы в шести местах и расчетную длину каждой осевой линии на расстоянии между двумя самыми дальними от середины разметками по образующей, например, от A1 до A3, от B1 до B3, от C1 до C3, от D1 до D3 (рис. 1.4). Затем необходимо зафиксировать каждое значение и рассчитать среднее.

Точность инструмента, используемого для измерения наружного диаметра и расчетной длины должна быть – 0,0005" (0,01 мм) или выше.

Для проведения разметки и измерений необходимо применение специального инструмента, представленного на рис. 1.5.

Для измерения диаметра годятся электронные микрометры, лазерные микрометры и точные микрометры со шкалой. Обычный ручной микрометр не приемлем, так как он обладает ограниченной точностью, а также оператор может легко деформировать трубу, если ее стенка слишком тонкая.

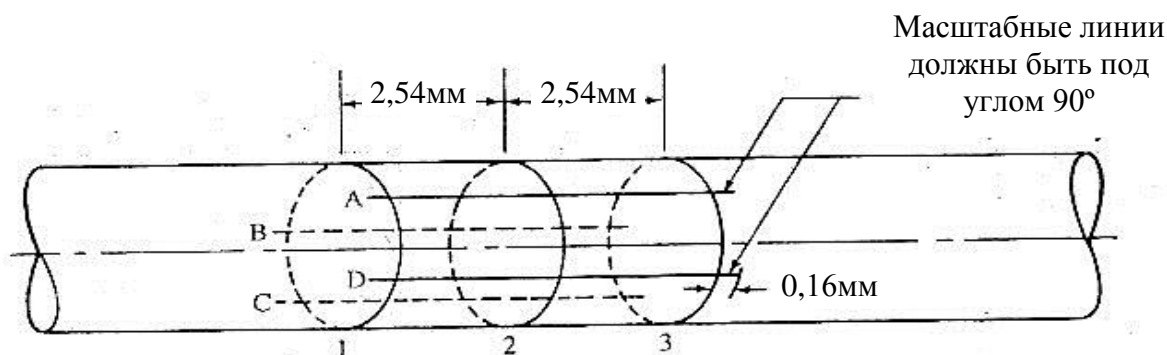


Рис. 1.4. Схема нанесения размерных линий [39]

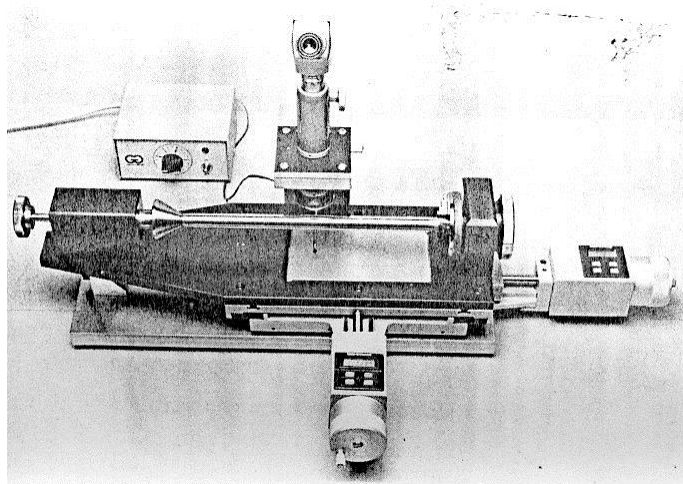


Рис. 1.5. Разметочный и измерительный инструмент для определения параметра CSR [7]

После окончания измерений производят испытание на растяжение трубы в соответствии с [41] на  $3,75\% \pm 0,25\%$  от расчетной (измеренной) длины со скоростью  $0,005 \pm 0,002$  дюйм/мм ( $0,127 \pm 0,051$  мм/мин). После разгрузки трубы повторяют осевые замеры длины и замеры наружного диаметра, обращая внимание на то, чтобы замеры производились в тех же положениях, что и раньше. Необходимо определить средние значения, как это описано ранее.

Для определения параметра отношения деформаций укорочения рассчитывают три деформации.

Истинную окружную деформацию  $\varepsilon_c$  определяют по формуле [39]:

$$\varepsilon_c = \ln \left( \frac{d_{cp}^H}{d_{cp}^K} \right), \quad (1.3)$$

где  $d_{cp}^H$ ,  $d_{cp}^K$  – средний наружный диаметр образца до и после деформации.

Истинную осевую деформацию  $\varepsilon_a$  определяют по формуле:

$$\varepsilon_a = \ln \left( \frac{l_{cp}^H}{l_{cp}^K} \right), \quad (1.4)$$

где  $l_{cp}^H$  и  $l_{cp}^K$  – средняя расчетная длина образца до и после деформации.

Истинную радиальную деформацию  $\varepsilon_r$  определяют из условия несжимаемости:

$$\varepsilon_r = -(\varepsilon_a + \varepsilon_c). \quad (1.5)$$

После определения осевой и радиальной деформации рассчитывают параметр отношения деформаций укорочения CSR по формуле [39]:

$$CSR = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_r}. \quad (1.6)$$

В табл. 1.1 приведены допускаемые значения параметра  $CSR$  для труб из титанового сплава Grade 9.

Согласно данным, приведенным в [7], низкие значения коэффициента (0,3 и менее) означают наличие строго тангенциальной кристаллографической текстуры, значения более 1,8 говорят о наличии строго радиальной текстуры. Соответственно значения  $CSR$  в интервале от 0,3 до 1,8 говорят о наличии в трубе радиально-тангенциальной текстуры.

Таблица 1.1

Размеры труб для минимально допустимых значений параметра отношения деформаций укорочения  $CSR$  [39]

| Номинальный наружный диаметр |      | Максимальная толщина стенки |      |
|------------------------------|------|-----------------------------|------|
| дюймы                        | мм   | дюймы                       | мм   |
| $CSR=1,3$                    |      |                             |      |
| 3/16                         | 4,8  | 0,020                       | 0,51 |
| 1/4                          | 6,4  | 0,022                       | 0,56 |
| 3/8                          | 9,5  | 0,032                       | 0,81 |
| 1/2                          | 12,7 | 0,043                       | 1,09 |
| 5/8                          | 15,9 | 0,054                       | 1,37 |
| 3/4                          | 19,0 | 0,065                       | 1,65 |
| 7/8                          | 22,2 | 0,077                       | 1,96 |
| 1                            | 25,4 | 0,088                       | 2,24 |
| $CSR=1,5$                    |      |                             |      |
| 1¼                           | 31,8 | 0,087                       | 2,21 |
| 1½                           | 38,1 | 0,090                       | 2,29 |

В настоящее время испытание на определение параметра отношения деформаций укорочения входит в американский стандарт AMS 4945 [41], в котором приводятся требования к производству, испытаниям и качеству бесшовных, гидравлических труб из титанового сплава Grade 9.

### 1.3. Положения теории деформации изотропных и анизотропных материалов

Согласно работам В.Л. Колмогорова [42] и Г.Я. Гуна [43] условие пластичности М. Губера – Р. Мизеса имеет вид:

$$T = \tau_s, \quad (1.7)$$



$$\text{где } T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} -$$

интенсивность касательных напряжений,  $\tau_s$  – сопротивление металла деформации сдвига,  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) – компоненты тензора напряжений.

Общая система уравнений, решение которой позволяет определить напряженно-деформированное состояние в любой точке несжимаемого деформируемого тела для достаточно медленных процессов, выглядит так:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} = 0; \\ \xi_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}); \\ \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = \frac{2T(H)}{H} \left( \xi_{ij} - \frac{1}{3} \xi \delta_{ij} \right); \\ \xi = 0. \end{cases} \quad (1.7)$$

где  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций,  $v_i$  – скорости перемещения частиц в металле,  $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$ ,  $\xi = \xi_{ii}$ ,  $\delta_{ij}$  – единичный тензор,  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига.

Для решения этой системы необходимо знать граничные условия, которые делятся на три вида: статические (1-го вида), кинематические (2-го вида) и смешанные (3-го вида). Граничные условия задаются на поверхности тела. На всей поверхности тела могут быть заданы граничные условия этих трех видов или они могут быть разнесены на разные части поверхности. В общем случае условие задания граничных условий можно представить в виде:

$$S = S_f + S_v + S_s, \quad (1.8)$$

где  $S_f$  – часть поверхности тела, на которой задаются статические граничные условия,  $S_v$  – часть поверхности тела, на которой задаются динамические граничные условия,  $S_s$  – часть поверхности тела, на которой задаются смешанные граничные условия.

Однако со временем выяснилось, что довольно большая часть материалов не подчиняется условию текучести М.Губера–Р.Мизеса из-за проявления анизотропии свойств.

В книге [44] со ссылкой на работу Р. Хилла [45] приведены уравнения, описывающие пластическое состояние анизотропного металла с изотропным упрочнением

$$\begin{aligned} & H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \\ & + 2N\sigma_{xy}^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 - 1 = 0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Здесь  $H, F, G, N, L, M$  – параметры анизотропии. Если условие пластичности (1.9) последовательно применить для частных случаев трех одноосных растяжений в направлении  $x, y, z$  и трех сдвигов между этими осями, то получим формулы:

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{Tx}^2} + \frac{1}{\sigma_{Ty}^2} - \frac{1}{\sigma_{Tz}^2} \right); \quad (1.10)$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{Ty}^2} + \frac{1}{\sigma_{Tz}^2} - \frac{1}{\sigma_{Tx}^2} \right); \quad (1.11)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{Tz}^2} + \frac{1}{\sigma_{Tx}^2} - \frac{1}{\sigma_{Ty}^2} \right); \quad (1.12)$$

$$N = \frac{1}{2\sigma_{Txy}^2}; \quad (1.13)$$

$$L = \frac{1}{2\sigma_{Tyx}^2}; \quad (1.14)$$

$$M = \frac{1}{2\sigma_{Tzx}^2}. \quad (1.15)$$

Здесь  $\sigma_{Tx}, \sigma_{Ty}, \sigma_{Tz}, \sigma_{Txy}, \sigma_{Tyx}, \sigma_{Tzx}$  – текущие пределы текучести в различных направлениях.

Уравнения (1.16-1.21) представляют собой условия связи приращений пластических деформаций и напряжений:

$$d\varepsilon_{xp} = k \cdot [H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) + G(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})] \quad (1.16)$$

$$d\varepsilon_{yp} = k \cdot [F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}) + H(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})] \quad (1.17)$$

$$d\varepsilon_{zp} = k \cdot [G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) + F(\sigma_{zz} - \sigma_{yy})] \quad (1.18)$$

$$d(\gamma_{xy})_p = 2k \cdot N\sigma_{xy} \quad (1.19)$$

$$d(\gamma_{yz})_p = 2k \cdot L\sigma_{yz} \quad (1.20)$$

$$d(\gamma_{zx})_p = 2k \cdot M\sigma_{zx} \quad (1.21)$$

где  $k$  – инвариантная константа.

Большой вклад в дальнейшее развитие теории деформации анизотропных материалов, в создание методик определения параметров

анизотропии внесли С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников и их коллеги [46, 47].

#### 1.4. Современные конечно-разностные методы решения краевых задач, реализованные на ЭВМ

Решение краевой задачи теории пластичности является трудоемким процессом из-за нелинейности входящих в систему уравнений и сложности граничных условий, поэтому в последнее время решение получают с помощью ЭВМ.

Метод конечных элементов (МКЭ) является численным методом решения дифференциальных уравнений, встречающихся в физике и технике [48]. Возникновение этого метода связано с решением задач космических исследований. За последующие 15 лет метод конечных элементов распространен на такие задачи как: гидромеханики, тепломассопереноса, строительной механики и механики сплошных сред. Последним применением МКЭ активно занимался О. Зенкевич [49, 50].

По его мнению, метод конечных элементов по существу сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы [50]. Затем между этими элементами каким-либо способом устанавливается взаимосвязь.

Применением метода конечных элементов для решения задач обработки металлов давлением активно занимался С. Кобаяши [51], многие из идей которого легли в основу программы для расчета процессов ОМД и термообработки DEFORM.

Начало разработки программ для расчета процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов началось в конце 80-х, начале 90-х годов в связи с интенсивным развитием вычислительной техники и увеличивающейся потребностью индустрии в дополнительных возможностях снижения себестоимости продукции. Это позволяло даже небольшим предприятиям, тратившим меньше времени и материальных ресурсов на разработку технологического процесса, оставаться конкурентоспособными.

За рубежом были разработаны следующие программы: DEFORM, ALPID (фирма SFTC), Superform, Superforge (фирма MSC), PamStamp (фирма ESI Group), Ansys LS-DYNA (фирма ANSYS, Inc.) и др.

Компания Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC) со штаб-квартирой в Огайо США начала разработку своего программного продукта в конце 80-х годов и уже в 1989 году вышла первая версия DEFORM-2D [52]. В 1993 году выходит первая версия DEFORM-3D.

С самого начала разработчики позиционировали этот продукт как универсальный, способный рассчитывать любые процессы ОМД:

листовую и сортовую прокатку, волочение, прессование, ковку, штамповку, операции трубного производства. Помимо этого в программе были реализованы возможность изучения напряженного состояния штампов и предсказание износа инструмента. Помимо этого существуют специальные версии программы DEFORM для решения задач термообработки с возможностью моделирования как фазового состава, так и зеренной структуры.

Программа DEFORM-3D имеет модульную структуру, в которую входят три основных модуля: подготовки исходных данных (Preprocessing), решения (Solver), и обработки и вывода результатов моделирования (Postprocessing).

В модуле «Preprocessing» осуществляется постановка задачи, которая включает в себя импорт геометрии заготовки и инструмента, разбивка их на конечные элементы, создание граничных и начальных условий, выбор условий проведения расчета. Именно грамотная постановка задачи является самым сложным этапом моделирования, требующим не только знания моделируемого процесса, но досконального изучения всех возможностей пакета моделирования.

Для облегчения этих операций в программе DEFORM-3D создан специальный мастер «Wizard», позволяющий осуществить постановку задачи посредством выполнения нескольких последовательных шагов, на каждом из которых задаются необходимые для расчета параметры. Однако данный мастер далеко не всегда приводит к желаемому результату, и поэтому подходит лишь для простых процессов ОМД.

Для сложных процессов, таких как прессование, штамповка, волочение и прокатка труб рекомендуется использовать модуль «Preprocessing». В возможности данного элемента входят:

- импорт геометрии из любого CAD приложения в формате stl с возможностью ее проверки и исправления непосредственно в программе DEFORM-3D,
- выбор среды моделирования: пластическая, упругая, упруго-пластическая и пористая,
- возможность автоматической генерации сетки конечных элементов на основе введенных пользователем параметров – количества элементов (относительная сетка), или минимальный размер элемента (абсолютная сетка). Помимо этого существует возможность ручного создания сетки с заданием областей крупной и мелкой разбивки заготовки,
- автоматическая перестройка сетки на основе настраиваемых пользователем параметров при ее значительном искривлении вследствие деформации,
- возможность выбора оборудования: молот, винтовой, кривошипный или гидравлический пресс или прокатный стан,

- возможность задания произвольного оборудования с заданием параметров перемещения его частей, а также сочетаний этих перемещений, например вращательного движения с поступательным,
- задание граничных условий симметрии для соответствующей заготовки и инструментов с целью уменьшения количества генерируемых конечных элементов, а как следствие, уменьшения времени расчета,
- задание граничных условий всех типов: тепловых, скоростных, в напряжениях, трения (используются два закона – по Кулону и по Зибелю),
- задание свойств материала заготовки и инструментов из обширной встроенной базы данных либо создание нового материала и самостоятельный ввод всех его свойств, включая кривые упрочнения (в виде таблицы или одной из нескольких функций) и другие прочностные, пластические и тепловые свойства,
- произвольный выбор параметров расчета – типа шагов (по времени или по перемещению), их продолжительности и количества, условий завершения расчета,
- автоматическая проверка правильности задания всех условий и возможности осуществления решения,
- создание базы данных, в которой содержится вся информация о рассчитываемом процессе.

Модуль «Solver» позволяет запускать расчет в различных режимах. Реализована возможность запуска в «пакетном» режиме, при котором программа последовательно решает несколько задач без вмешательства пользователя, поддержка многопроцессорных вычислений.

В ходе расчета ведется журнал, в который записывается вся информация о процессе: название метода расчета, номер шага, номера итераций, ошибки вычислений, время решения на каждом шагу, номера узлов сетки заготовки вошедших в контакт с инструментом и вышедших из него. Кроме этого в журнал заносятся записи о «Substepping» разбиении шагов на «подшаги», которые применяются при недостижении заданной величины ошибки за заданное количество итераций. В этом случае программа уменьшает перемещение и снова пытается добиться сходимости.

Модуль «Postprocessing» становится доступным после окончания расчета. В этом модуле находятся инструменты для исследования процесса деформации в число возможностей, которых входит:

- выбор любого записанного в базу данных шага деформации, с возможностью просмотра деформирования и записи анимации,
- масштабирование заготовки с любым увеличением, ее поворот, выбор варианта отображения,

- восстановление полной заготовки по ее симметричной части, для более наглядного просмотра процесса деформации,
- отображение на заготовке различных видов полей распределения (деформаций, напряжений, скоростей деформаций, тепловых). Более того, в отличие от большинства других расчетных программ можно выводить не только интегральные величины (как, например, эквивалентная степень деформации), но и отдельные компоненты тензоров напряжений и деформаций, в частности главные, возможность выбора вариантов отображения этих распределений и их крайних значений,
- рассечение заготовки плоскостью – с построением на ней вышеупомянутых эпюр распределения,
- задание на поверхности заготовки или на любом из ее сечений двумерной сетки, либо создание трехмерной сетки и последующее наблюдение за ее искривлением,
- задание «трассируемых» точек, – которые будут перемещаться при деформации, и в которых записываются свойства, выводимые в виде графиков.

Таким образом, можно отметить, что программный продукт DEFORM-3D обладает всеми возможностями не только для промышленного, но и для научного исследования.

Среди российских аналогов можно выделить программные комплексы ПЛАСТ, Рапид, применяющиеся на кафедре ОМД УГТУ-УПИ и QFORM фирмы QUANTOR.

Программный продукт ПЛАСТ, используемый на кафедре ОМД УГТУ-УПИ с начала 90-х годов, был разработан сотрудниками Института технической физики Свердловского отделения РАН А.В. Сокоделовым и Е.А. Ереминым [53].

Данный комплекс предназначен для решения линейных и нелинейных двумерных квазистатических задач методом конечных элементов в перемещениях. Возможен расчет в осесимметричной и плоской постановке. Имеются следующие варианты применения пакета [53]:

- математическое моделирование пластического течения;
- расчет деталей и конструкций на прочность;
- расчет напряженно-деформированного состояния и размеров заготовки на любой стадии нагружения;
- определение усилия деформирования и прочности инструмента;
- определение поврежденности металла при пластической деформации, остаточной поврежденности после отжига заготовки.

Программный комплекс «ПЛАСТ» функционирует в среде MS DOS. Структура пакета представляет собой совокупность диалоговых блоков и функциональных программ, связь между которыми осуществляется посредством общих и личных наборов данных, являющихся файлами прямого доступа. Имеются следующие диалоговые блоки: математической постановки, вычислительной постановки, подготовки к расчету, редактирования счета, отображения, модификации файла с данными материалов.

Промежуточные и окончательные результаты расчета сохраняются на диске и могут быть выведены на дисплей в виде графиков, рисунков уровней, отрисовки геометрии и вида сетки на всех стадиях нагружения.

Несмотря на то, что программа «ПЛАСТ» хорошо себя зарекомендовала, ее свойственны отдельные недостатки, большинство из которых обусловлены ограничениями среды MS DOS:

неудобство интерфейса пользователя, необходимость знания команд управления и их консольного ввода,

невозможность непосредственного экспорта полученных данных в другие программы для дальнейшей обработки,

трудности при работе из-под современных операционных систем, особенно при отображении шрифтов,

возможность лишь двухмерной постановки задачи обработки металлов давлением,

проблемы при расчете напряженного состояния деформируемого тела.

В Уральском государственном техническом университете на кафедре прикладной геометрии и информатики разработан программный комплекс РАПИД (Расчет пластического деформирования) [54].

Система РАПИД предназначена для моделирования, анализа, разработки и оптимизации технологических процессов горячей объемной штамповки. Данный программный комплекс позволяет провести индивидуальный анализ, исследование и корректировку каждого технологического процесса до изготовления оснастки и его окончательной отладки [55].

Система РАПИД позволяет:

- исследовать формоизменение и схему напряженного состояния;
- рассчитать энергосиловые параметры процесса;
- прогнозировать образование дефектов (незаполнение штампов, зажимов, утяжин, образование трещин).
- осуществлять моделирование многопереходных процессов.

В постановку задачи входит подготовка информации о геометрии инструмента, подбор исходной заготовки и задание технологических

условий. Пользователь формирует данные о геометрии инструмента и заготовки, механических и тепловых граничных условиях.

Система РАПИД имеет базу данных со справочной информацией о механических и тепловых свойствах материалов, энергосиловых и скоростных характеристиках оборудования и позволяет пользователю дополнять ее.

Обмен данными о геометрии инструмента между системой РАПИД и САД системами осуществляется через файлы в стандартных форматах.

В программе определяется напряженно-деформированное состояние, формоизменение, температурное поле в процессе деформации, усилия на инструмент и накопленная деформация. Дополнительно рассчитывается остывание или нагрев заготовки между переходами.

Пользователь имеет возможность просмотреть на экране дисплея поля скоростей, напряжений, скоростей деформации, накопленных деформаций, температуры деформируемого материала и других величин на разных стадиях процесса. Имеется режим просмотра, позволяющий проследить изменение этих величин в течение процесса. Система позволяет просматривать процесс формоизменения заготовки в режиме кадрового просмотра [55].

Основные ограничения программного комплекса РАПИД заключаются в узкой специализации программы с ориентацией на процессы кузнечно-штамповочного производства.

В настоящее время самой распространенной как в нашей стране, так и за рубежом программой по расчету процессов ОМД методом конечных элементов лидером, разработанной в России является QFORM [56].

Первым разработанным компанией QUANTOR коммерческим программным продуктом был созданный в 1991 году пакет FORM-2D, предназначенный для конечно-элементного моделирования объемной штамповки [57]. Эта программа работала под MS DOS и обеспечивала расчет осесимметричного и плоского течения металла.

Последней разработкой компании QUANTOR является программный комплекс QFORM, развиваемый с 2006 года.

Данная программа предназначена для моделирования процессов горячей и холодной объемной штамповки,ковки, электровысадки, прессования, деформации порошков, сортовой прокатки и вальцовки.

Согласно [58] данная программа основана на методе конечных элементов (ядре системы). Конечно-элементные алгоритмы специальным образом адаптированы для расчета процессов формоизменения. Сам конечно-элементный расчет скрыт от пользователя. При проведении технологического расчета ядро системы работает как “черный ящик”. Говоря об особенностях системы QFORM, следует выделить следующие основные моменты:



- Программа является полнофункциональным объектно-ориентированным приложением Windows.
- Полностью интегрированная архитектура QFORM обеспечивает синхронное выполнение работ любой части программы. Визуализация процессов формоизменения происходит одновременно с расчетом, что позволяет немедленно интерпретировать получаемые результаты и вносить в технологию необходимые изменения.
- При подготовке исходных данных пользователь оперирует исключительно технологическими понятиями, а мастер подготовки исходных данных позволяет быстро и легко ввести все необходимые для расчета параметры параллельно с их отображением для визуального контроля.
- Программа QFORM обеспечивает автоматическое формирование расчетных моделей (разбиение на конечные элементы).
- QFORM позволяет проанализировать всю технологическую цепочку получения поковки, включая нагрев, охлаждение и пластическое деформирование на всех переходах, изменение свойств материала. Моделирование такой технологической цепочки выполняется автоматически и дает возможность пользователю быстро и эффективно проанализировать несколько различных вариантов.

Программа QFORM объединяет двумерное и трехмерное моделирование в одной программе [56, 58]. Для перехода к трехмерному моделированию необходимо лишь выбрать в качестве исходной геометрической информации не двумерные контуры поперечных сечений, а твердотельные модели штампов и заготовки. Все остальные данные задаются так же, как и для двумерного расчета с использованием удобного и наглядного Мастера Подготовки Данных.

Интеграция двумерного и трехмерного моделирования в одной программе дает возможность эффективно моделировать технологические цепочки, состоящие из нескольких штамповочных переходов, первые из которых обладают осевой симметрией и могут быть быстро решены в двумерной постановке (например, осадка и предварительные переходы), а последующие требуют полномасштабного трехмерного моделирования [56].

Геометрия заготовок и инструмента может быть импортирована в программу QFORM из любого CAD пакета через стандартные форматы обмена (IGES и STEP для 3D) либо, в случае 2D задач, создана непосредственно в программе, посредством встроенного модуля QDraft.

В программе QFORM реализованы генерация конечно-элементной сетки с криволинейными элементами, описываемыми поверхностями, либо кривыми второго порядка, что позволяет достоверно описывать геометрию заготовок и инструмента.

Программа автоматически строит конечно-элементную сетку на поверхности и в объеме штампов и заготовки и перестраивает ее в процессе решения по мере необходимости [58].

К возможностям программы QFORM относятся следующие [58]:

- Предусмотрен расчет штамповки с количеством инструментов от одного до двадцати.
- Материал заготовки и инструмента, а также смазка и оборудование берутся из БД, которая настраивается на каждого пользователя индивидуально.
- Деформация заготовки рассматривается с учетом тепловых процессов. Штампы рассчитываются без учета температурного поля.
- Операции формоизменения заготовок рассчитываются для кривошипного прессы, молота, гидравлического и винтового прессы.
- Реализована возможность деформирования вращательным оборудованием для решения задач моделированияковки на ковочных вальцах.
- Реализовано автоматическое моделирование повторяющихся ударов на молоте и на винтовом прессе.
- Возможна обрезка по заданному контуру «излишков» металла, вышедших за пределы очага деформации непосредственно в ходе расчета, что уменьшает размерность модели и экономит время.
- Моделируется движение заготовки как твердого тела под воздействием силы тяжести, трения и инерции при укладке ее на нижний штамп для определения естественного устойчивого положения перед началом моделирования формоизменения.
- Моделируется возникновение складки.
- Моделируется возникновение прострелов с помощью приповерхностных Лагранжевых линий (линий течения металла).
- Моделируется напряженно-деформированное состояние цельного и составного инструментов под воздействием контактных напряжений, возникающих при деформировании заготовки.
- Возможен расчет параметров в определенных «трассируемых» точках.
- Анимация нескольких операций в цепочке и нескольких ударов в молоте и винтовом прессе. Позволяет проиграть результаты расчета более чем по одному удару и одной операции.
- Расчет износа на инструменте.

Недостатки программного продукта QFORM обусловлены его ориентацией на применение в промышленном производстве. К ним можно отнести следующие:

- Невозможность ручной генерации и настройки параметров сетки, таких как размер элемента и их количество.

- При постановке тепловой задачи не учитывается нагрев инструментов от заготовки.
- Невозможность вывода ряда параметров напряженного и деформированного состояния, таких как главные деформации и напряжения.

Таким образом, применимость программы QFORM для научных исследований в области текстуробразования ограничена.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

### 2.1. Оценка анизотропных свойств путем определения стандартных механических характеристик

Как отмечалось в постановке задачи исследования, необходимо изучить особенности анизотропии свойств титановых сплавов. Особенно большой интерес представляет описание свойств  $\alpha$  - сплавов титана, поскольку их естественное состояние определяется ГПУ – решеткой, которая по своей природе не является полностью симметричной. Сам титан обладает слишком невысоким уровнем прочностных свойств, поэтому редко применяется в качестве конструкционного материала. Широкое распространение в промышленности получил сплав Grade 9, который обладает удачным сочетанием прочностных и пластических характеристик. Однако из практики его обработки известно, что сплав обладает неприятной технологической особенностью: при холодной прокатке труб не устраняется исходная разностенность, что может объясняться анизотропией свойств в важных для технологического процесса направлениях. Именно поэтому в качестве объекта изучения с позиции материала был выбран сплав Grade 9.

Наибольшим спросом пользуются трубы из сплава Grade 9, применяемые в авиастроении, поэтому с позиции выбора геометрии заготовки для проведения испытаний отобрана горячепрессованная трубная заготовка размерами 86,36x11,43 мм из сплава Grade 9.

Технология получения этой заготовки состоит из следующих основных операций.

1. Ковка слитка с целью проработки структуры и получения необходимой формы поковки.
2. Резка прокованной заготовки на краты и сверление в них отверстий, с последующей механической обработкой.
3. Прессование заготовки (шашки) на вертикальном или горизонтальном прессе с целью получения трубной заготовки.
4. Правка и механическая обработка трубной заготовки, отжиг.
5. Прокатка трубной заготовки на станах холодной прокатки труб.

На первом этапе использованы стандартные методы испытания металлов: растяжение образцов, осадка цилиндрических образцов, испытания на удар, определение твердости образцов по Бринеллю и Роквеллу и микротвердости по Виккерсу. Все испытания проведены для образцов, изготовленных из горячепрессованной трубной заготовки.

Для испытаний на растяжение изготовлены стандартные образцы (стандарт ASTM E8) длиной 70 мм с длиной рабочей части 25 мм и ее диаметром 6,3 мм. Метод изготовления заключался в разрезке абразивным

кругом кольцевого темплета и проточке полученных сегментов на токарном станке. На торец образца нанесли метку в виде линии, соответствующей радиальному направлению в трубе. Фиксировали начальную расчетную длину образца  $l_0^{pact}$ , начальный диаметр рабочей части цилиндрического образца до разрыва  $d_0^{pact}$ , конечную расчетную длину образца  $l_k^{pact}$ , минимальный диаметр цилиндрического образца после его разрыва  $d_k^{pact}$ . Целью испытания было определение условного предела текучести  $\sigma_{0,2}^{pact}$ , временного сопротивления металла на разрыв  $\sigma_b^{pact}$ , относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$ .

Растяжение проводили на испытательной машине FP-100/1 и строили соответствующие диаграммы. После испытания по шкале прибора определена максимальная сила, предшествующая разрыву  $P_{max}^{pact}$ , по диаграмме растяжения определяли  $P_{0,2}^{pact}$  – силу, при которой относительная деформация образца составила 0,2 %.

Рассчитаны начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца до разрыва  $F_0^{pact} = \pi \cdot \frac{d_0^{pact}{}^2}{4}$  и минимальная площадь поперечного сечения образца после его разрыва  $F_k^{pact} = \pi \cdot \frac{d_k^{pact}{}^2}{4}$ . Для определения  $F_k^{pact}$  цилиндрического образца после разрыва измерен минимальный диаметр  $d_k^{pact}$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднему арифметическому из полученных значений вычисляли площадь поперечного сечения образца после разрыва  $F_k^{pact}$ .

Значения условного предела текучести определяли по формуле  $\sigma_{0,2}^{pact} = \frac{P_{0,2}^{pact}}{F_0^{pact}}$ , значения временного сопротивления металла на разрыв – по формуле  $\sigma_b^{pact} = \frac{P_k^{pact}}{F_k^{pact}}$ .

Относительное удлинение образца после разрыва в процентах вычисляли по формуле  $\delta = \frac{(l_k^{pact} - l_0^{pact}) \cdot 100}{l_0^{pact}}$ , относительное сужение после разрыва вычисляли по формуле  $\psi = \frac{(F_0^{pact} - F_k^{pact}) \cdot 100}{F_0^{pact}}$ .

В табл. 2.1 приведены значения опытных данных при растяжении образцов.

Таблица 2.1

Данные, полученные в опытах на растяжение

| №<br>исп. | $d_0^{раст}$ ,<br>мм | $d_{\kappa}^{раст}$ ,<br>мм | $\sigma_{0,2}^{раст}$ ,<br>МПа | $\sigma_{\epsilon}^{раст}$ ,<br>МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
|-----------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------|
| 1         | 6,24                 | 3,68                        | 751                            | 850                                 | 18,0         | 65,2       |
| 2         | 6,25                 | 3,80                        | 748                            | 844                                 | 18,8         | 63,0       |
| 3         | 6,31                 | 3,95                        | 724                            | 831                                 | 19,2         | 60,9       |

После разрыва было выявлено, что шейка в плане имеет форму эллипса (рис. 2.1), причем отношение большой и малой оси эллипса составляет величину около 2. Такая форма поперечного сечения шейки не характерна для изотропного материала, поэтому можно предположить о наличии разницы в свойствах трубы в зависимости от направления испытания. Полученную эллипсность нельзя отнести на счет погрешности при испытаниях на растяжение, т.к. на всех шейках испытанных образцов большая ось эллипса располагалась перпендикулярно радиальному направлению трубы. Это можно объяснить облегченным течением металла в радиальном направлении, и затрудненным в тангенциальном, т.е. сопротивление металла деформации вдоль радиуса трубы меньше, чем вдоль тангенциального направления.

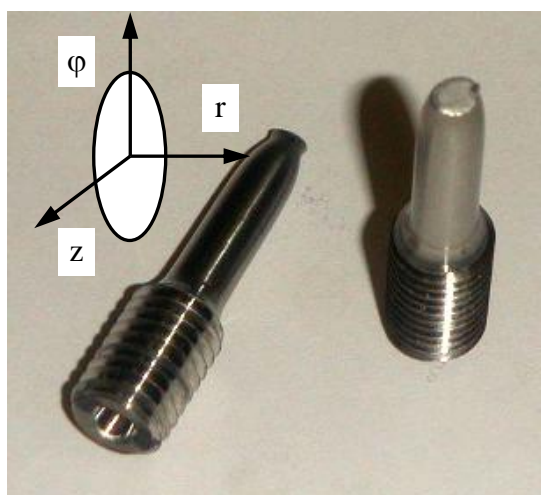


Рис. 2.1. Образец на растяжения после испытания и положение поперечного сечения шейки относительно осей в трубе

Испытание на ударную вязкость КСУ проводили по ГОСТ 9454 на испытательной машине КМ-2130. Из стенки трубы вдоль ее образующей вырезаны образцы шириной  $B^{удар}$  и высотой в сечении надреза  $H^{удар}$ . Перед испытанием вычисляли площадь поперечного сечения образца  $F_0^{удар}$  по формуле  $F_0^{удар} = H_0^{удар} \cdot F_0^{удар}$ . Для образцов удалось отметить направление надреза – для образцов 1.1–1.3 оно параллельно

тангенциальному направлению в трубе, для образцов 2.1–2.3 оно параллельно радиальному направлению в трубе (испытания на определение ударной вязкости проводилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях в трубе). На рис. 2.2 приведено расположение образцов для испытаний на ударную вязкость и направлений удара относительно оси трубы.

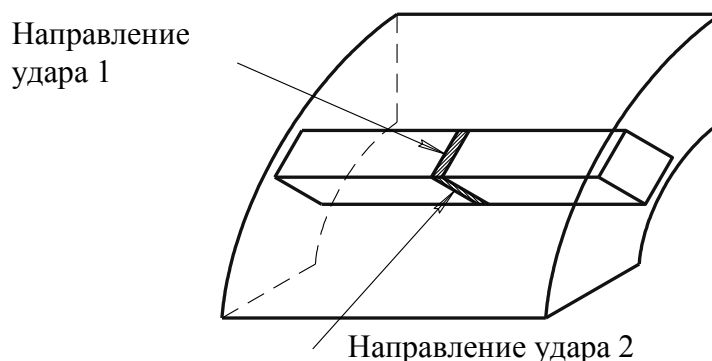


Рис. 2.2. Эскиз расположения ударного образца в трубе

При испытаниях определяли работу удара  $A^{удар}$  и по формуле  $KCU = \frac{A^{удар}}{F_0^{удар}}$  оценивали ударную вязкость металла. В табл. 2.2 приведены опытные данные, полученные при испытаниях на КСУ.

Из табл. 2.2 видно, что ударная вязкость для образцов в радиальном направлении несколько меньше, чем в тангенциальном, но разница не превышает 16%. Наличие различия в значениях ударной вязкости в радиальном и тангенциальном направлении трубы свидетельствуют о наличии анизотропии распределения свойств по направлениям в стенке трубы. Отличие в ударной вязкости для образцов из альфа-сплавов ОТ4 и ОТ4-1 также отмечается в работе Б.А. Колачева [59] со ссылкой на работы [60-61].

Для проведения испытаний по измерению твердости изготовлены четыре образца кубической формы с длиной ребра 10 мм, причем грани кубиков были ориентированы перпендикулярно радиальному, тангенциальному и продольному направлениям трубы. Каждая грань кубика пронумерована цифрами от 1 до 6, причем сумма цифр на параллельных гранях составляла 7, т.е. грань под номером 1 параллельна грани под номером 6, грань 2 параллельна грани 5, грань 3 параллельна грани 4. Схема вырезки кубического образца из стенки трубы, его ориентация относительно направлений в трубе и нумерация граней показана на рис. 2.3.

Таблица 2.2

Данные, полученные в опытах на КСУ

| № образца | $B^{удар}$ , мм | $H^{удар}$ , мм | $A^{удар}$ , Дж | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| 1.1       | 7,51            | 8,10            | 71              | 1,16                    |
| 1.2       | 7,37            | 8,09            | 78              | 1,30                    |
| 1.3       | 7,47            | 8,10            | 71              | 1,16                    |
| 2.1       | 7,55            | 8,10            | 80              | 1,31                    |
| 2.2       | 7,59            | 8,10            | 85              | 1,39                    |
| 2.3       | 7,55            | 8,10            | 84              | 1,38                    |

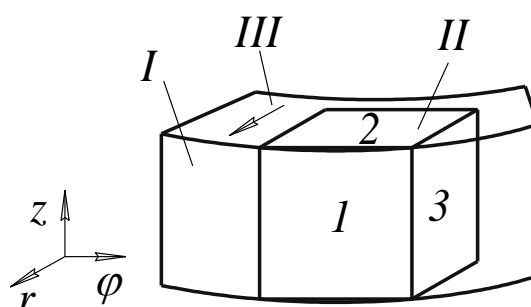


Рис. 2.3. Схема вырезки кубического образца:

I – труба из Grade 9, II – вырезаемый образец кубической формы, с нанесенной на него нумерацией граней, III – направление радиуса трубы

Измерения твердости по Роквеллу HRC (ГОСТ 9013) на гранях кубического образца проведены на испытательной машине Wilson. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.3, средние арифметические значения твердостей на трех гранях кубиков показаны на рис. 2.4.

Из рис. 2.4 видно, что наименьшее значение твердости имеет грань 2, перпендикулярная продольному направлению в трубе, в то время как грани 1 и 3 перпендикулярные соответственно радиальному и тангенциальному, имеют одинаковое значение твердости.

Таблица 2.3

Значения твердости HRC в различных направлениях

| Номер испытания | Номер грани кубика |    |    |    |    |    |
|-----------------|--------------------|----|----|----|----|----|
|                 | 1                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| 1               | 28                 | 26 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| 2               | 28                 | 26 | 28 | 27 | 27 | 27 |
| 3               | 29                 | 26 | 28 | 28 | 26 | 26 |



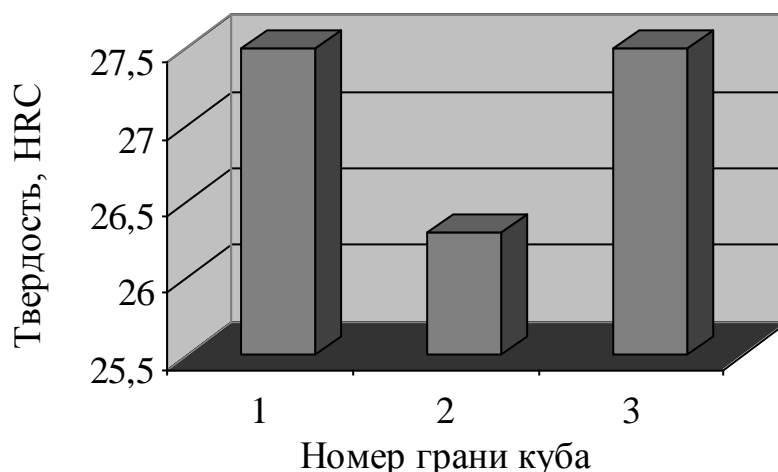


Рис. 2.4. Сравнение твердости HRC по направлениям

Измерения твердости по Бринеллю НВ (ГОСТ 9012) проведены на испытательной машине ТШ-2м при нагрузке 7500 Н, с диаметром шарика – индентора 5 мм. Для получения значения твердости при помощи микроскопа измерялись две взаимно перпендикулярные диагонали отпечатка  $d_1^{твер}$  и  $d_2^{твер}$ , и находилось среднее значение диагонали отпечатка  $d_{cp}^{твер} = \frac{d_1^{твер} + d_2^{твер}}{2}$ . Диагонали измеряли в направлениях, параллельных сторонам измеряемой грани. Значения опытных данных приведены в табл. 2.4.

Из табл. 2.4 видно, что существуют отличия значений твердости на разных гранях, но на параллельных гранях твердость практически одинаковая. Распределение твердости по граням кубического образца приведено на рис. 2.5.

Наименьшее значение твердости имеет грань 2, перпендикулярная продольному направлению в трубе, в то время как грани 1 и 3 имеют одинаковое значение твердости.

Было замечено, что существует отличие между диагоналями измеряемого отпечатка (в районе 6%) для образца, причем это отличие сохраняется практически постоянным на параллельных гранях. Не меняются и направления больших осей эллипсов, полученных при внедрении индентора. Такой эффект можно объяснить, если предположить, что существует анизотропия в упругих свойствах и они не совпадают для различных направлений в трубе. Различные упругие деформации в перпендикулярных направлениях трубы, при разгрузке могли привести к образованию эллипса.

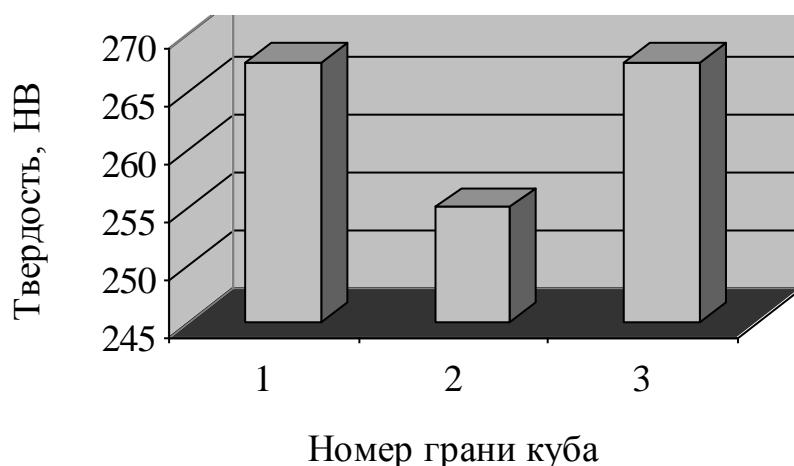


Рис. 2.5. Сравнение твердости НВ по направлениям

Измерения микротвердости по Виккерсу НВ проведены на испытательной машине ПМТ-3М при нагрузке 200 г. Измерения проводили на трех перпендикулярных гранях кубического образца, представленного на рис. 2.3.

Таблица 2.4

Твердость НВ в различных направлениях

| Номер образца | Номер грани | $d_1^{мер}, \text{мм}$ | $d_2^{мер}, \text{мм}$ | $d_{cp}^{мер}, \text{мм}$ | Значение твердости, НВ |
|---------------|-------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1             | 1           | 1,80                   | 1,92                   | 1,86                      | 266                    |
|               | 2           | 1,90                   | 1,90                   | 1,90                      | 255                    |
|               | 3           | 1,90                   | 1,82                   | 1,86                      | 266                    |
|               | 4           | 1,87                   | 1,82                   | 1,85                      | 269                    |
|               | 5           | 1,90                   | 1,90                   | 1,90                      | 255                    |
|               | 6           | 1,80                   | 1,90                   | 1,85                      | 269                    |
| 2             | 1           | 1,90                   | 1,90                   | 1,90                      | 255                    |
|               | 2           | 1,90                   | 1,90                   | 1,90                      | 255                    |
|               | 3           | 1,90                   | 1,90                   | 1,90                      | 255                    |
|               | 4           | 1,90                   | 1,85                   | 1,88                      | 260                    |
|               | 5           | 1,85                   | 1,85                   | 1,85                      | 269                    |
|               | 6           | 1,85                   | 1,90                   | 1,88                      | 260                    |

Результаты измерений приведены в табл. 2.5. Разница между направлениями 1 и 2, 1 и 3 составляет более 10 %, а между гранями 2 и 3 более 20 %. При этом наименьшее значение микротвердости наблюдается у грани 2 (как и в случае определения твердости по Бринеллю), а наибольшее – у грани 3, перпендикулярной тангенциальному направлению

в трубе. Средние значения микротвердости каждой из граней куба приведены на рис. 2.6.

Таблица 2.5

Микротвердость по Виккерсу в различных направлениях

| Номер грани куба | Номер испытания |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| 1                | 285,9           | 289,3 | 282,6 | 285,7 | 282,5 | 285,9 | 285,7 | 285,9 | 296,3 | 292,8 |
| 2                | 267,0           | 258,5 | 253,1 | 267,0 | 264,1 | 264,1 | 267,0 | 258,5 | 255,8 | 250,5 |
| 3                | 319,7           | 324,0 | 319,7 | 337,5 | 328,4 | 332,9 | 337,5 | 328,4 | 328,4 | 319,7 |

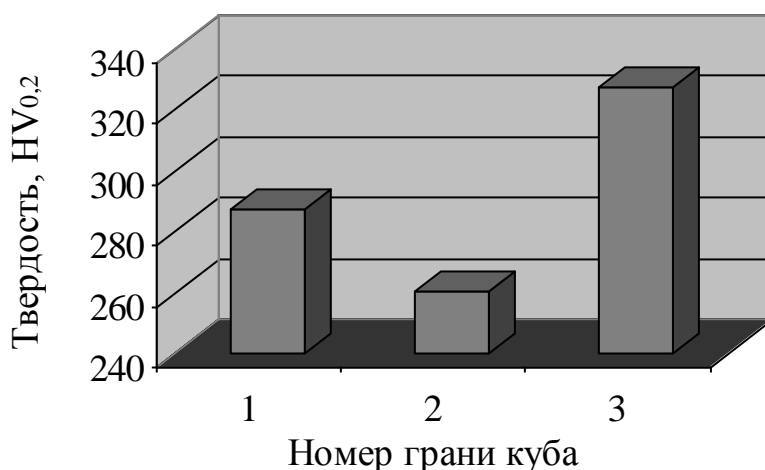


Рис. 2.6. Сравнение микротвердости образца по Виккерсу по направлениям

Для подтверждения различного течения металла в радиальном и тангенциальном направлениях, выявленных при растяжении образцов, выполнено еще одно стандартное испытание – осадка цилиндрических образцов между плоско параллельными бойками.

Для испытаний на осадку использовали пресс ЦД 100ПУ. На токарном станке в продольном направлении трубы вырезаны цилиндрические образцы высотой  $h_0^{oc}$ , и диаметром  $d_0^{oc}$ . В качестве смазки применена смесь графита с солидолом, нанесенная на торцевые поверхности цилиндров. В результате испытаний на осадку у всех цилиндров образовалась большая бочка, что говорит о плохих фрикционных свойствах смазки, т.е. на контактных поверхностях на течение металла значительное влияние оказывали силы трения. В результате этого было принято решение измерять высоту образца после

осадки  $h_1^{oc}$ , и максимальное и минимальное значение диаметра образца в сечении бочки –  $d_{\max}^{oc}$ ,  $d_{\min}^{oc}$ . В центральном сечении образца, где и образовалась бочка, влияние сил трения на течение металла минимально, поэтому оно определяется только сопротивлением металла пластическому течению в разных направлениях, т.е. анизотропией его свойств. При проведении испытаний фиксировали максимальное усилие пресса при осадке  $P_1^{oc}$  и определяли степень относительное обжатие  $\varepsilon^{oc} = \frac{h_0^{oc} - h_1^{oc}}{h_0^{oc}}$ .

Полученные результаты приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Результаты осадки цилиндрических образцов

| №<br>оп. | $d_0^{oc}$ ,<br>мм | $h_0^{oc}$ , мм | $h_1^{oc}$ , мм | $d_{\max}^{oc}$ ,<br>мм | $d_{\min}^{oc}$ ,<br>мм | $\varepsilon^{oc}$ , % | $P_1^{oc}$ ,<br>кН |
|----------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| 1        | 8,56               | 17,40           | 11,31           | 11,48                   | 10,51                   | 35                     | 100                |
| 2        | 8,48               | 17,00           | 10,00           | 11,86                   | 11,28                   | 41                     | 100                |
| 3        | 8,30               | 17,00           | 10,99           | 11,34                   | 10,85                   | 35                     | 100                |
| 4        | 8,50               | 17,40           | 10,84           | 12,02                   | 11,03                   | 38                     | 100                |

Данные табл. 2.6 подтверждают результаты опытов определения твердости, течение металла в разных направлениях различно, т.е. у горячепрессованной трубной заготовки из сплава Grade 9 существует анизотропия свойств.

Кроме испытаний на осадку цилиндров, осадке подвергали кубические образцы, вырезанные из стенки трубы и пронумерованные в соответствии с рис. 2.3. При осадке образцов вдоль продольного направления (оси  $z$ ) одна из боковых граней (грань, перпендикулярная оси  $r$ ) приобрела характерную для осадки с трением выпуклую форму (рис. 2.7, а – левая грань образца, рис. 2.7, б – верхняя грань образца), а на другой (перпендикулярной тангенциальному направлению трубы – оси  $\phi$ ) – на части поверхности форму бочки, а часть осталась практически неискривленной (рис. 2.7,а – верхняя грань образца, рис. 2.7,б – левая грань образца). Такое необычное искривление ребра куба, перпендикулярного тангенциальному направлению трубы, может быть вызвано наличием неоднородности распределения свойств по толщине стенки трубы.

По результатам этой части работы был сделан вывод о необходимости описания свойств металла уравнениями, учитывающими анизотропию свойств.



Рис. 2.7. Кубические образцы после осадки с трением

Результаты этих экспериментов изложены авторами в работах [62-64].

## 2.2. Исследование текстуры металла рентгенографическим методом

Для исследования текстуры из трубы вырезан кубический образец со сторонами 10 мм, таким образом, что его грани были перпендикулярны соответствующим направлениям в трубе, стороны этого образца были пронумерованы в соответствии с рис. 2.3. Риски от механической обработки удаляли с помощью тонкой шлифовальной бумаги и последующего травления. Для исследования образца и построения текстурогамм интенсивности отражения рентгеновских лучей применяли дифрактометр Дрон 3М. Исследование проводили в медном излучении при напряжении на рентгеновской трубке 30 КВ и силе тока 14 мА в диапазоне углов  $2\theta$  от  $34^\circ$  до  $154^\circ$ . Текстурный анализ выполняли методом построения обратных полюсных фигур (ОПФ) для трех ортогональных плоскостей, 1 – хордовое сечение (перпендикулярное радиусу трубы), 2 – сечение, перпендикулярное образующей трубы, 3 – радиальное сечение (перпендикулярное тангенциальному направлению в трубе).

ОПФ и данные для их построения приведены на рис. 2.8.

На рис. 2.8 в виде таблиц приведены  $\{h,k,l\}$  – мюллеровские индексы кристаллических плоскостей,  $I_{обр}$  – интегральная интенсивность отражения исследуемого образца,  $I_{эт}$  – интегральная интенсивность отражения бестекстурного эталона (в качестве которого был применен альфа титан),  $A_{hkl}$  – доля кристаллов в бестекстурном образце,  $P_{hkl}$  – полюсная плотность. Полюсная плотность определяет число кристаллитов в металле, имеющих определенную ориентировку базисной плоскости, в качестве которой для гексагональной решетки принимают плоскость  $\{0,0,0,1\}$ , т.е. она определяет преимущественную текстуру.

Текстурное состояние плоскости 1 – многокомпонентное, наибольшую полюсную плотность (интенсивность) – 4 единицы имеет компонента призмы  $(11\bar{2}0)$ , базис  $(0001)$  и отклоненный базис  $(11\bar{2}3)$  имеет полюсную плотность порядка 2,5 единицы, кроме этого присутствует компонента пирамиды  $(11\bar{2}2)$  интенсивностью также 2,5 единицы.

Хордовое сечение – плоскость 2 имеет кристаллографическую текстуру с очень сильной компонентой пирамиды  $(20\bar{2}1)$  интенсивностью 6,95 и сильной компонентой призмы  $(10\bar{1}0)$  интенсивностью 5,08.

Радиальное сечение – плоскость 3 имеет текстуру, однотипную с сечением 1, т.е. в этом сечении текстурное состояние характеризуется теми же кристаллографическими компонентами, но иными по значению полюсной плотности. Компонента  $(11\bar{2}0)$  имеет полюсную плотность 3,8, базис и отклоненный базис имеют соответственно полюсные плотности 3,7 и 2,5 единицы, а интенсивность пирамиды  $(11\bar{2}2)$  практически такая же – приблизительно 2 единицы.

Полученные данные свидетельствует о том, что текстура радиально-тангенциальная с более сильной тангенциальной компонентой, т.е. нормали базисных плоскостей (шестиугольников) ГПУ-решетки расположились вдоль тангенциального направления в трубе, при этом часть кристаллитов наклонена к образующей трубы.

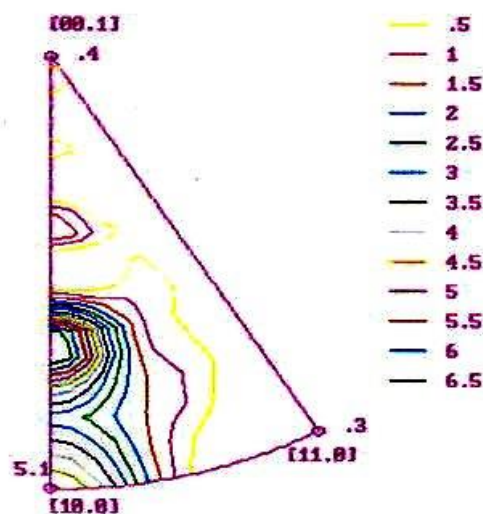
Названия текстуры – тангенциальная, радиальная взяты в соответствии с названиями текстур, принятыми в работе [7]. Расположение кристаллитов в трубе показано на рис. 2.9. Альфа-титан имеет ГПУ решетку, число плоскостей скольжения у него не велико, и направление  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  – сторона шестиугольника базисной плоскости играет важную роль при пластической деформации, в качестве основного направления скольжения. Тангенциальная текстура означает ориентацию базисных плоскостей параллельно радиусу трубы и перпендикулярно тангенциальному направлению трубы, что приводит к облегченному течению металла в радиальном направлении, и затрудненному течению

металла в тангенциальном направлении. Это подтверждает результаты, полученные в опытах на растяжение образцов.

Обратная полюсная фигура  
труба Ø86,39x11,43 сплав Gr9 пл. 8-45-2884

**Плоскость 2**  
Эталон ППАН\_А: Титан альфа

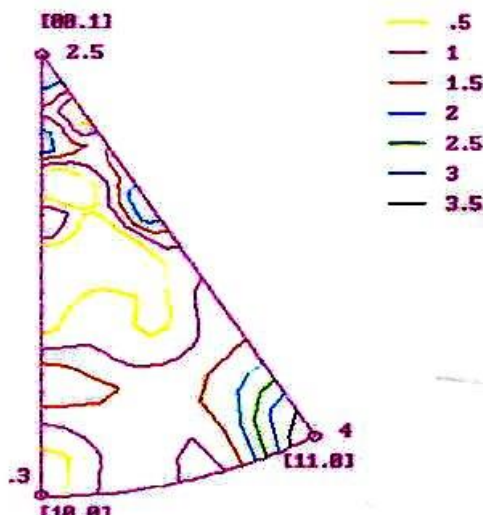
| n {h k l}  | Iобр   | Iэт    | Ahkl   | Phkl      |
|------------|--------|--------|--------|-----------|
| 1 {1 0 0}  | 110.00 | 22.00  | 0.044  | 5.08 5.08 |
| 2 {0 0 2}  | 10.00  | 28.00  | 0.018  | 0.36 0.36 |
| 3 {1 0 1}  | 100.00 | 100.00 | 0.051  | 1.02 1.02 |
| 4 {1 0 2}  | 2.50   | 20.00  | 0.061  | 0.13 0.13 |
| 5 {1 1 0}  | 4.00   | 12.00  | 0.032  | 0.34 0.34 |
| 6 {1 0 3}  | 9.00   | 25.00  | 0.046  | 0.37 0.37 |
| 7 {1 1 2}  | 12.00  | 22.00  | 0.045  | 0.55 0.55 |
| 8 {2 0 1}  | 82.00  | 12.00  | 0.053  | 6.95 6.95 |
| 9 {1 0 4}  | 0.00   | 6.00   | 0.040  | 0.00 0.00 |
| 10 {2 0 3} | 1.00   | 10.00  | 0.053  | 0.10 0.10 |
| 11 {2 1 0} | 0.00   | 3.00   | 0.041  | 0.00 0.00 |
| 12 {2 1 1} | 11.00  | 16.00  | 0.125  | 0.70 0.70 |
| 13 {1 1 4} | 5.00   | 17.00  | 0.098  | 0.30 0.30 |
| 14 {2 1 1} | 4.00   | 6.00   | 0.098  | 0.68 0.68 |
| 15 {1 0 5} | 3.00   | 14.00  | -0.064 | 0.22 0.22 |
| 16 {2 1 3} | 10.00  | 24.00  | 0.097  | 0.42 0.42 |
| 17 {3 0 2} | 28.00  | 20.00  | 0.032  | 1.42 1.42 |



Обратная полюсная фигура  
труба Ø86,39x11,43 сплав Gr9 пл. 8-45-2884

**Плоскость 1**  
Эталон ППАН\_А: Титан альфа

| n {h k l}  | Iобр  | Iэт    | Ahkl  | Phkl      |
|------------|-------|--------|-------|-----------|
| 1 {1 0 0}  | 5.00  | 22.00  | 0.044 | 0.31 0.31 |
| 2 {0 0 2}  | 51.00 | 28.00  | 0.018 | 2.48 2.48 |
| 3 {1 0 1}  | 15.00 | 100.00 | 0.051 | 0.20 0.20 |
| 4 {1 0 2}  | 11.00 | 20.00  | 0.061 | 0.75 0.75 |
| 5 {1 1 0}  | 35.00 | 12.00  | 0.032 | 3.98 3.98 |
| 6 {1 0 3}  | 39.00 | 25.00  | 0.046 | 2.13 2.13 |
| 7 {1 1 2}  | 41.00 | 22.00  | 0.045 | 2.54 2.54 |
| 8 {2 0 1}  | 5.00  | 12.00  | 0.053 | 0.57 0.57 |
| 9 {1 0 4}  | 6.00  | 6.00   | 0.040 | 1.36 1.36 |
| 10 {2 0 3} | 3.00  | 10.00  | 0.053 | 0.41 0.41 |
| 11 {2 1 0} | 2.00  | 3.00   | 0.041 | 0.91 0.91 |
| 12 {2 1 1} | 9.00  | 16.00  | 0.125 | 0.77 0.77 |
| 13 {1 1 4} | 18.00 | 17.00  | 0.098 | 1.44 1.44 |
| 14 {2 1 1} | 0.00  | 6.00   | 0.098 | 0.00 0.00 |
| 15 {1 0 5} | 15.00 | 14.00  | 0.064 | 1.46 1.47 |
| 16 {2 1 3} | 13.00 | 24.00  | 0.097 | 0.74 0.74 |
| 17 {3 0 2} | 0.00  | 20.00  | 0.032 | 0.00 0.00 |



Обратная полюсная фигура  
труба Ø86,39x11,43 сплав Gr9 пл. 8-45-2884

**Плоскость 3**  
Эталон ППАН\_А: Титан альфа

| n {h k l}  | Iобр  | Iэт    | Ahkl  | Phkl      |
|------------|-------|--------|-------|-----------|
| 1 {1 0 0}  | 5.00  | 22.00  | 0.044 | 0.29 0.29 |
| 2 {0 0 2}  | 80.00 | 28.00  | 0.018 | 3.69 3.69 |
| 3 {1 0 1}  | 34.00 | 100.00 | 0.051 | 0.44 0.44 |
| 4 {1 0 2}  | 15.00 | 20.00  | 0.061 | 0.97 0.97 |
| 5 {1 1 0}  | 35.00 | 12.00  | 0.032 | 3.77 3.77 |
| 6 {1 0 3}  | 45.00 | 25.00  | 0.046 | 2.32 2.32 |
| 7 {1 1 2}  | 35.00 | 22.00  | 0.045 | 2.06 2.06 |
| 8 {2 0 1}  | 3.00  | 12.00  | 0.053 | 0.32 0.32 |
| 9 {1 0 4}  | 9.00  | 6.00   | 0.040 | 1.95 1.95 |
| 10 {2 0 3} | 7.00  | 10.00  | 0.053 | 0.90 0.90 |
| 11 {2 1 0} | 0.00  | 3.00   | 0.041 | 0.00 0.00 |
| 12 {2 1 1} | 10.00 | 16.00  | 0.125 | 0.81 0.81 |
| 13 {1 1 4} | 11.00 | 17.00  | 0.098 | 0.84 0.84 |
| 14 {2 1 1} | 5.00  | 6.00   | 0.098 | 0.55 0.55 |
| 15 {1 0 5} | 6.00  | 14.00  | 0.064 | 1.46 1.46 |
| 16 {2 1 3} | 10.00 | 24.00  | 0.097 | 0.54 0.54 |
| 17 {3 0 2} | 0.00  | 20.00  | 0.032 | 0.00 0.00 |

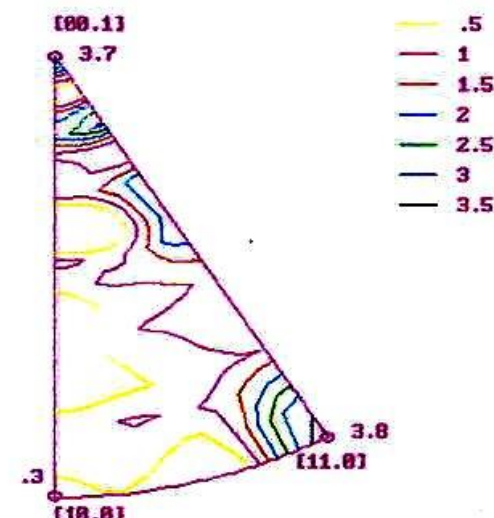


Рис. 2.8. Обратные полюсные фигуры для трех направлений в трубе из Grade 9

В работе [7] показано, что возможно получение в трубах не только тангенциальной, но и радиальной текстуры. В частности, если при деформации трубы, обжатие главным образом происходит по диаметру трубы, кристаллы имеют тенденцию к окружной ориентации вокруг трубы (образуется тангенциальная текстура трубы). Если применяется сильное обжатие по толщине стенки, то трубы будут содержать большое количество кристаллов, имеющих базисные полюса вблизи радиального направления (в трубе будет наблюдаться радиальная текстура). Получение радиальной текстуры привело бы к ориентации базисных плоскостей параллельно тангенциальному направлению, т.е. к более легкому течению металла в тангенциальном направлении и возможности перераспределения его по стенке трубы. К аналогичному эффекту могло бы привести получение в трубе аксиальной текстуры, когда нормали базисных плоскостей расположены вдоль образующей трубы.

В работах А.А. Богатова, Г.А. Орлова и др. [65-66] приведены способы устранения разнотолщинности труб из изотропных материалов на стадии холодной прокатки. Однако в данном случае для этого предлагается сформировать текстуру прессованной трубной заготовки перед ХПТ.

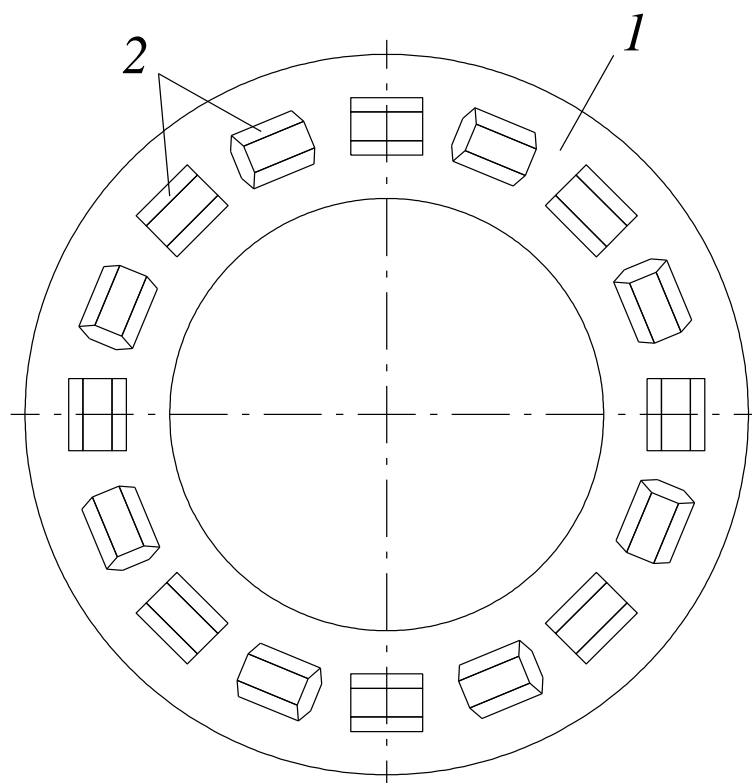


Рис. 2.9. Эскиз расположения кристаллитов ГПУ решетки в трубе: 1 – труба, 2 – кристаллиты, ориентированные в двух различных направлениях



### 2.3. Исследование микроструктуры трубной заготовки

На рис. 2.10. – 2.23 представлены фотографии микроструктуры трех граней кубического образца, вырезанного из трубной заготовки  $\varnothing 86,36 \times 11,43$  мм сплава Grade 9. Расположение образца и нумерация граней здесь соответствует рис. 2.3.

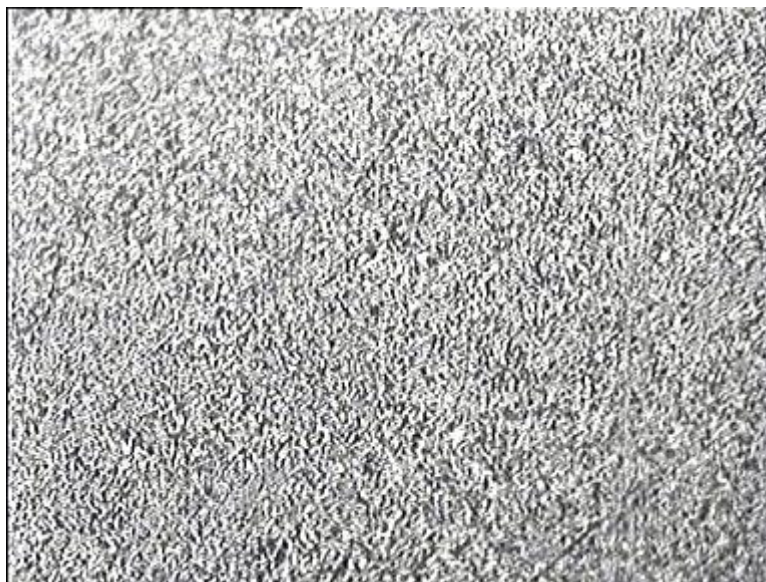


Рис. 2.10. Типичная микроструктура плоскости 2 (x250)



Рис. 2.11. Типичная микроструктура плоскости 2 (x1000)

Микроструктура грани № 2 представляет собой однородную мелкозернистую смесь глобулярной и удлиненной  $\alpha$ -фазы в превращенной  $\beta$ -матрице. Размер первичной  $\alpha$ -фазы составляет в среднем 2-3 мкм. Количество первичной  $\alpha$ -фазы – 45-50%.

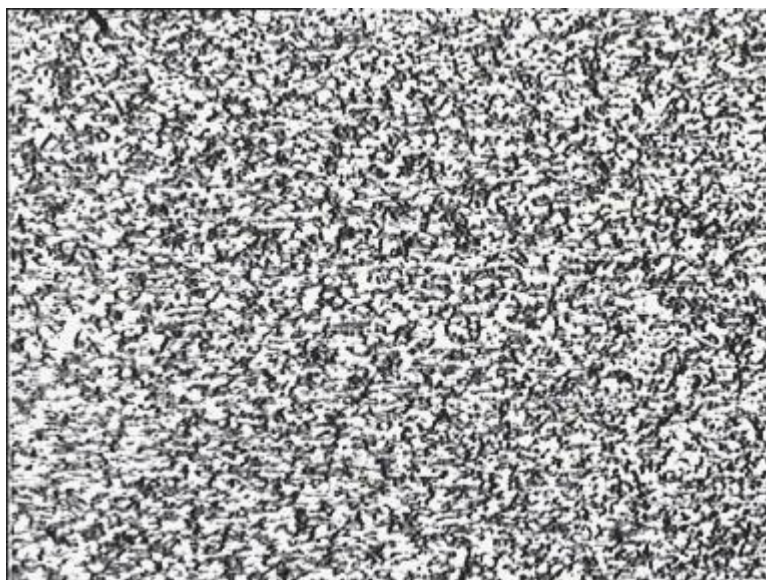


Рис. 2.12. Типичная микроструктура плоскости 1 (x250)

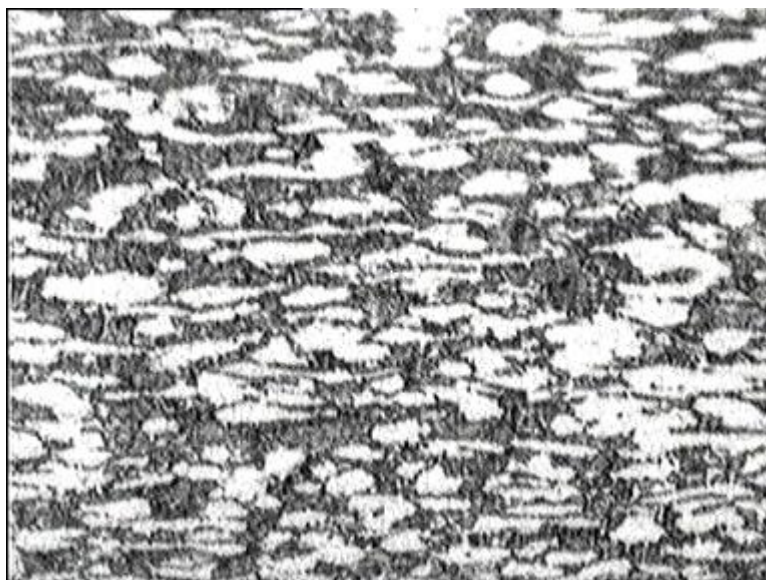


Рис. 2.13. Типичная микроструктура плоскости 1 (x1000)

Микроструктура граней № 1,3 также представляет мелкозернистую смесь глобулярной и удлиненной  $\alpha$ -фазы в превращенной  $\beta$ -матрице. Размер первичной  $\alpha$ -фазы – 2-5 мкм. Количество первичной  $\alpha$ -фазы – 45-50%.



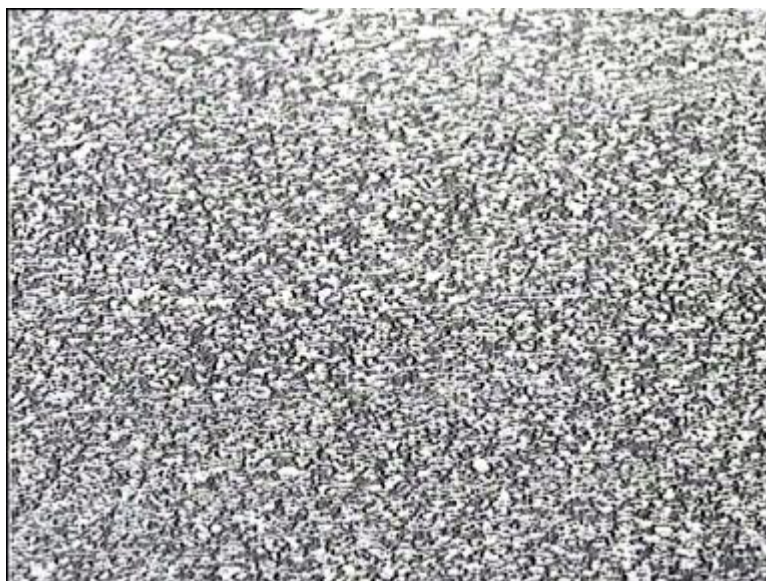


Рис. 2.14. Типичная микроструктура плоскости 3 (x250)

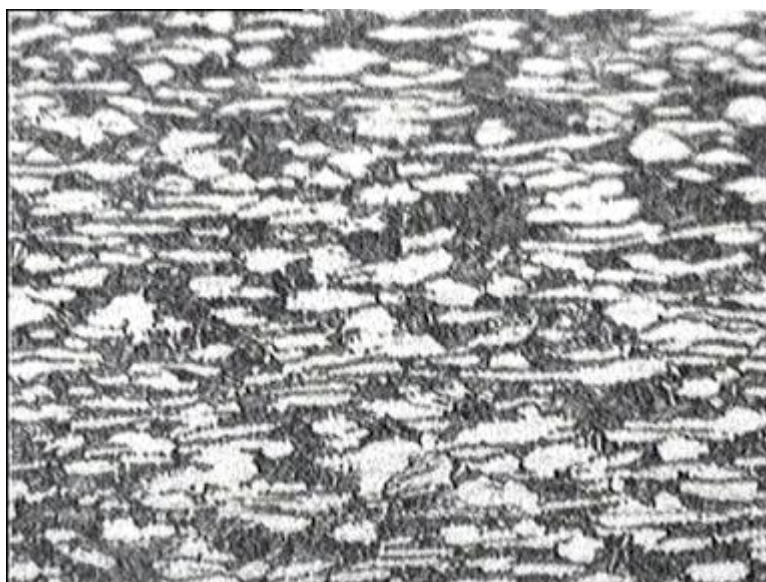


Рис. 2.15. Типичная микроструктура плоскости 3 (x1000)

В микроструктуре данных плоскостей на фоне вышеуказанной структуры встречаются отдельные участки, представляющие собой полосы (рис. 2.16, 2.17, 2.20, 2.21). шириной приблизительно 10-15 мкм, состоящие из вытянутых в одном направлении  $\alpha$ -частиц размерами 1,0-1,5 $\times$ 20-25 мкм.

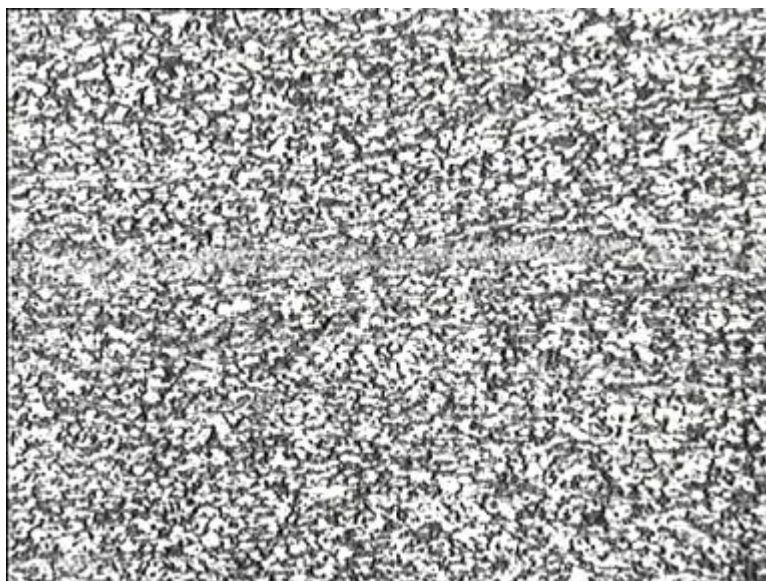


Рис. 2.16. Удлиненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 1 (x250)

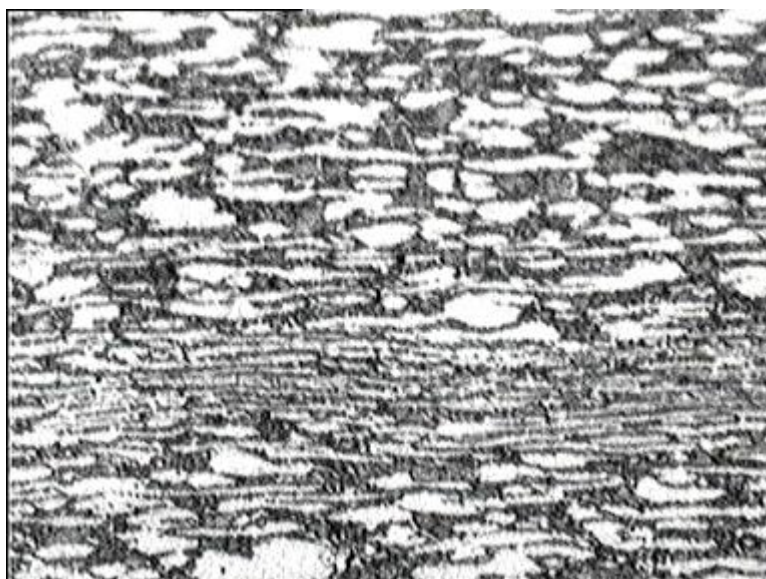


Рис. 2.17. Удлиненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 1 (x1000)

Также в микроструктуре встречаются единичные участки укрупненной  $\alpha$ -фазы размерами 10-22 мкм (рис. 2.18, 2.19, 2.22, 2.23).

Анализ микроструктуры показывает, что она практически одинакова на трех исследуемых гранях кубического образца.



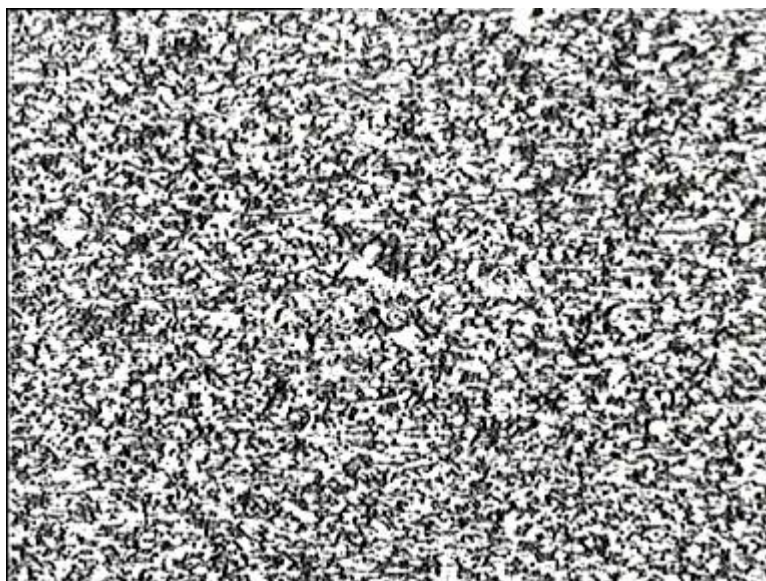


Рис. 2.18. Укрупненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 1 (x250)



Рис. 2.19. Укрупненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 1 (x1000)

В микроструктуре граней № 1, 3 при увеличениях 500; 1000 наблюдается небольшая направленность структуры, что свойственно для продольного направления.

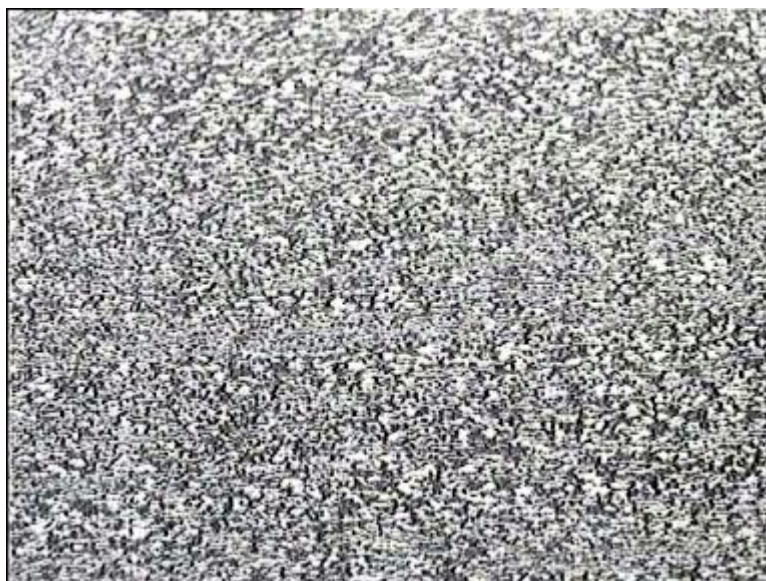


Рис. 2.20. Удлиненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 3 (x250)

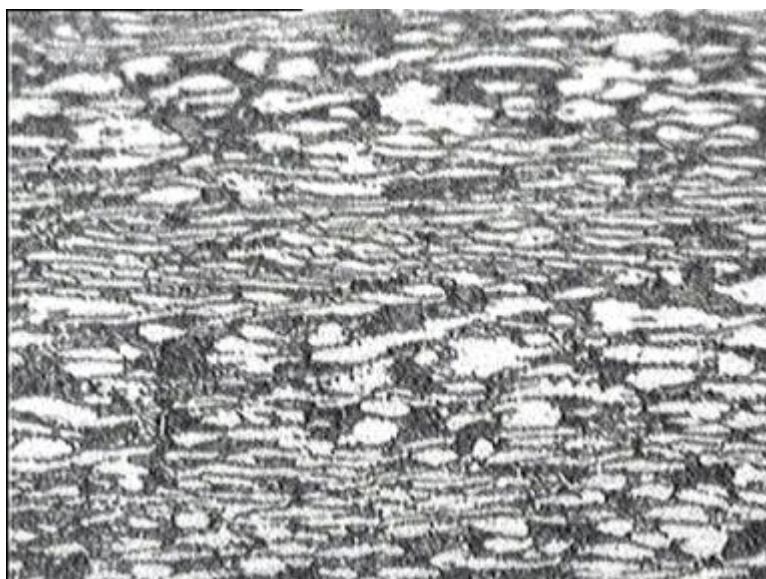


Рис. 2.21. Удлиненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 3 (x1000)



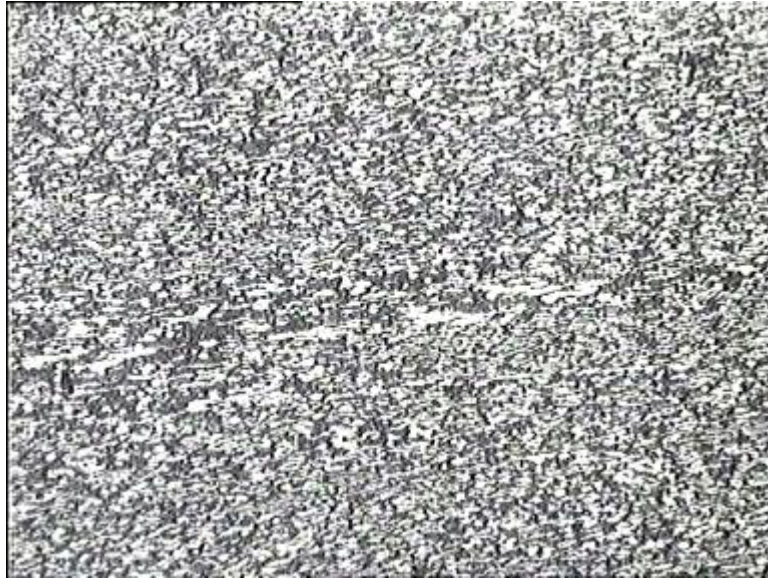


Рис. 2.22. Укрупненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 3 (x250)

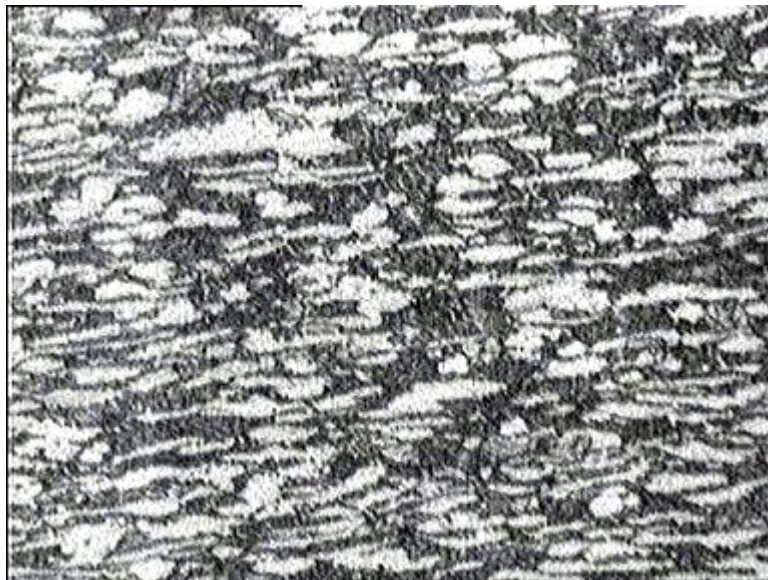


Рис. 2.23. Укрупненная  $\alpha$ -фаза в микроструктуре плоскости 3 (x1000)

#### 2.4. Анализ деформированного состояния образцов при осадке в различных направлениях

Запишем полученные в работах Р.Хилла уравнения связи напряжений  $\sigma_{ij}$  ( $i = r, \varphi, z$ ) и приращений деформаций  $d\varepsilon_{ij}$  (1.16-1.18) для анизотропного материала с изотропным упрочнением в декартовой системе координат трубной заготовки (рис. 2.3)

$$d\varepsilon_{rr} = k \cdot [H(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) + G(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})]; \quad (2.1)$$

$$d\varepsilon_{\varphi\varphi} = k \cdot [F(\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz}) + H(\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{rr})]; \quad (2.2)$$

$$d\varepsilon_{zz} = k \cdot [G(\sigma_{zz} - \sigma_{rr}) + F(\sigma_{zz} - \sigma_{\varphi\varphi})], \quad (2.3)$$

Выражения (1.10-1.12) для определения параметров анизотропии можно представить в следующем виде:

$$H_0 + G_0 = \frac{1}{\sigma_{Tr}^2}; \quad (2.4)$$

$$H_0 + F_0 = \frac{1}{\sigma_{T\varphi}^2}; \quad (2.5)$$

$$F_0 + G_0 = \frac{1}{\sigma_{Tz}^2}, \quad (2.6)$$

где  $\sigma_{Ti} (i = r, \varphi, z)$  - пределы текучести вдоль соответствующих осей.

Допустим, что соответствующие пределы текучести  $\sigma_{Ti}$  равны соответствующим сопротивлениям деформации  $\sigma_{si}$ , тем самым допустим, что характер анизотропии свойств сохраняется за весь период испытаний, т.е.  $\sigma_{Ti} = \sigma_{si}$ .

Для нахождения значений параметров анизотропии  $H, F, G$  необходимо определить пределы текучести  $\sigma_{Ti} (i = r, \varphi, z)$  вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений в трубе – радиального, тангенциального и продольного. Для проведения эксперимента вырежем образец в виде куба, из стенки трубы, так как показано на рис. 2.3, т.е. чтобы его грани были перпендикулярны соответствующим направлениям в трубе. Образец подвергнем испытанию на осадку в трех взаимно перпендикулярных направлениях, начиная с направления вдоль оси  $z$ . Предположим, что в направлении  $r$  свойства образца не совпадают ни со свойствами вдоль оси  $\varphi$ , ни со свойствами вдоль оси  $z$  (рис. 2.24).

Примем, что в опыте реализовано одноосное напряженное состояние, тогда  $\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = 0$  и уравнения (2.1-2.3) преобразуются к виду

$$d\varepsilon_{rr} = -k \cdot G \cdot \sigma_{zz}; \quad (2.7)$$

$$d\varepsilon_{\varphi\varphi} = -k \cdot F \cdot \sigma_{zz}; \quad (2.8)$$

$$d\varepsilon_{zz} = k \cdot \sigma_{zz} \cdot (G + F) = k \cdot \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_{Tz}^2}; \quad (2.9)$$

Из условия текучести Р.Хилла (1.9), записанного в следующем виде



$$H \cdot (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + F \cdot (\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz})^2 + G \cdot (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 = 1 \quad (2.10)$$

и допущения, что  $\sigma_{ii}$  являются главными напряжениями, следует, что  $\sigma_{zz} = \sigma_{Tz} = \sigma_{sz}$ . Эти преобразования более подробно приведены в [67-70].

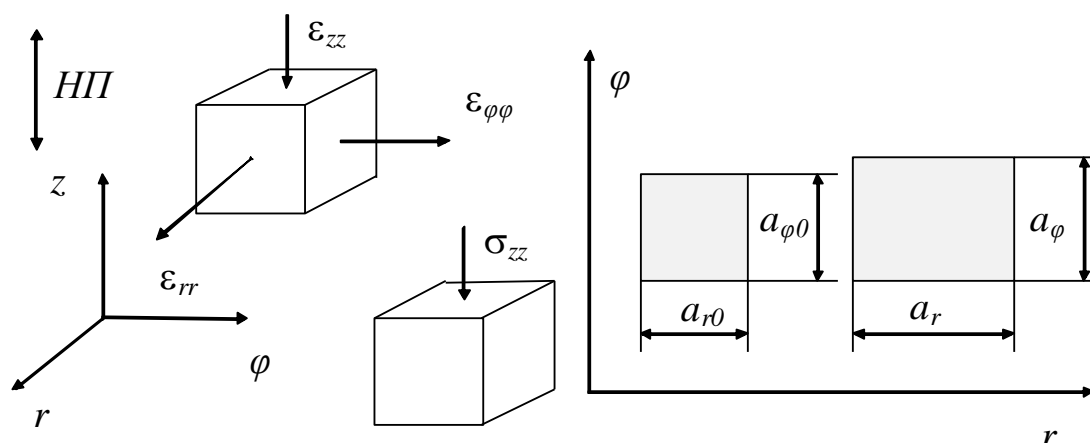


Рис. 2.24. Расположение элементарного объема анизотропного металла в декартовой системе координат и изменение конфигурации квадратной в плане заготовки после деформации: НП - направление прессования

Аналогичные рассуждения можно провести для случаев осадки кубического образца и в других направлениях.

Для описания  $\sigma_{Ti}$  необходимо провести дополнительные опыты, которые будут описаны ниже.

Из титановой трубы изготавливали образцы кубической формы со сторонами (ребрами) длиной  $a_{r0}$ ,  $a_{\varphi0}$ ,  $a_{z0}$ . Индексы при сторонах означают направление, которому данное ребро параллельно. Образцы подвергали сжатию двумя бойками, с предварительным нанесением на контактные поверхности смазки путем смачивания контактных поверхностей машинным маслом с чешуйчатым графитом. Для создания нагрузки использовали вертикальный гидравлический пресс максимальным усилием 500кН. Фиксировали размеры образца  $a_r$ ,  $a_\varphi$ ,  $a_z$ , а также силу осадки  $P$ . Деформацию вели поэтапно, с шагом по усилию испытательной машины в 20 кН. Осадку проводили в трех взаимно перпендикулярных направлениях, принимая текущую длину стороны кубика, вдоль которой осуществлялась осадка за  $h$ .

Для анализа деформированного состояния металла после проведения эксперимента рассчитывали следующие безразмерные характеристики деформации: коэффициенты вытяжек вдоль направлений, перпендикулярных направлению осадки  $\lambda_i = \frac{a_i}{a_{i0}}$  ( $i=r, \varphi, z$ ), коэффициенты

высотной деформации  $\left(\frac{1}{\eta}\right)_i = \frac{a_{i0}}{h} (i=r, \varphi, z)$ . Также определяли относительное обжатие  $\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\%$  ( $h_0$  – начальная высота образца).

Значения опытных данных приведены в табл. 2.7–2.9.

Зависимости  $\lambda_i (i=r, \varphi, z)$  от  $\left(\frac{1}{\eta}\right)_i$  для случаев осадки кубиков вдоль трех направлений показаны на рис. 2.25–2.27.

Анализ опытных данных показывает, что удлинение в радиальном и продольном направлении больше удлинения в тангенциальном направлении и эта разница не имеет тенденции к снижению при возрастании степени деформации. Отношение  $\lambda_r/\lambda_\varphi$  как показатель анизотропии материала достигает величины 1,08, а отношение  $\lambda_z/\lambda_\varphi$  – достигает 1,06.

Течение металла в тангенциальном направлении затруднено по сравнению с остальными направлениями. Образец, осажженный по направлению оси  $\varphi$ , при достижении усилия испытательной машины 190 кН разрушился.

Коэффициенты вытяжки в радиальном и продольном направлении практически совпадают, однако при увеличении относительного обжатия разница между ними растет, хотя отношения  $\lambda_r/\lambda_z$  и не составляет более 3%.

Таблица 2.7

Результаты осадки кубического образца вдоль продольного направления

| P, кН | h, мм | a <sub>r</sub> , мм | a <sub>φ</sub> , мм | ε, % | 1/η  | λ <sub>r</sub> | λ <sub>φ</sub> | λ <sub>r</sub> /λ <sub>φ</sub> |
|-------|-------|---------------------|---------------------|------|------|----------------|----------------|--------------------------------|
| 0     | 9,87  | 10,07               | 10,08               | 0    |      |                |                |                                |
| 110   | 8,93  | 10,78               | 10,63               | 10   | 1,11 | 1,07           | 1,05           | 1,015                          |
| 130   | 8,3   | 11,27               | 10,95               | 16   | 1,19 | 1,12           | 1,09           | 1,030                          |
| 150   | 7,84  | 11,66               | 11,24               | 21   | 1,26 | 1,16           | 1,12           | 1,038                          |
| 170   | 7,33  | 12,11               | 11,61               | 26   | 1,35 | 1,20           | 1,15           | 1,044                          |
| 190   | 6,82  | 12,66               | 11,98               | 31   | 1,45 | 1,26           | 1,19           | 1,058                          |
| 210   | 6,42  | 13,14               | 12,37               | 35   | 1,54 | 1,30           | 1,23           | 1,063                          |

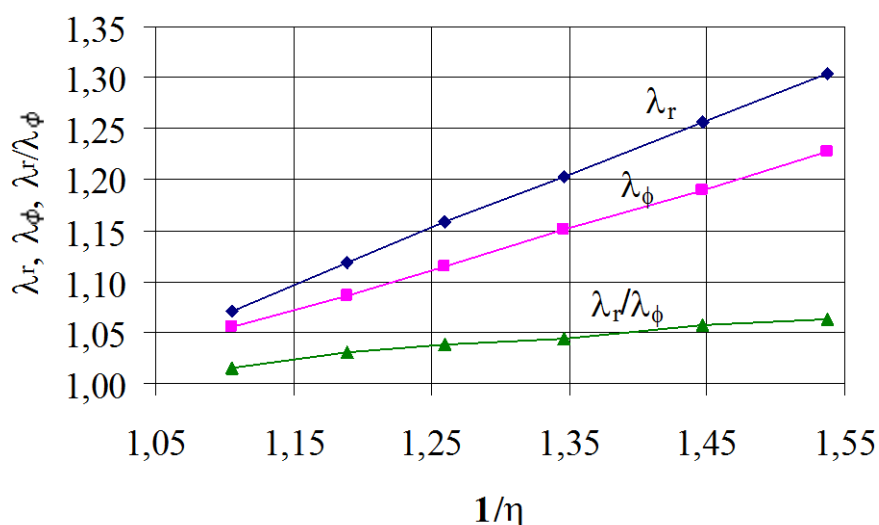


Рис. 2.25. Зависимости  $\lambda_r$ ,  $\lambda_\phi$ ,  $\lambda_r/\lambda_\phi$  для куба, осаженного вдоль продольного направления – оси z

Таблица 2.8

Результаты осадки кубического образца вдоль радиального направления

| P, кН | h, мм | a <sub>z</sub> , мм | a <sub>φ</sub> , мм | ε, % | 1/η  | λ <sub>z</sub> | λ <sub>φ</sub> | λ <sub>z</sub> /λ <sub>φ</sub> |
|-------|-------|---------------------|---------------------|------|------|----------------|----------------|--------------------------------|
| 0     | 10,04 | 9,89                | 10,03               | 0    |      |                |                |                                |
| 90    | 10    | 9,94                | 10,11               | 0,4  | 1,00 | 1,01           | 1,01           | 0,997                          |
| 110   | 9,5   | 10,34               | 10,3                | 5,4  | 1,06 | 1,05           | 1,03           | 1,018                          |
| 130   | 8,71  | 10,9                | 10,71               | 13,2 | 1,15 | 1,10           | 1,07           | 1,032                          |
| 150   | 7,97  | 11,5                | 11,24               | 20,6 | 1,26 | 1,16           | 1,12           | 1,038                          |
| 170   | 7,44  | 12,01               | 11,6                | 25,9 | 1,35 | 1,21           | 1,16           | 1,050                          |

Резкое увеличение разницы между ними при достижении относительного обжатия 26% можно объяснить зародившимися трещинами в образце, по которым впоследствии и произошел скол – разрушение образца. Разрушение осаживаемых кубических образцов всегда происходило одинаковым образом при осадке их вдоль тангенциального направления. Поверхность скола (рис. 2.28) находились перпендикулярно радиусу трубы.

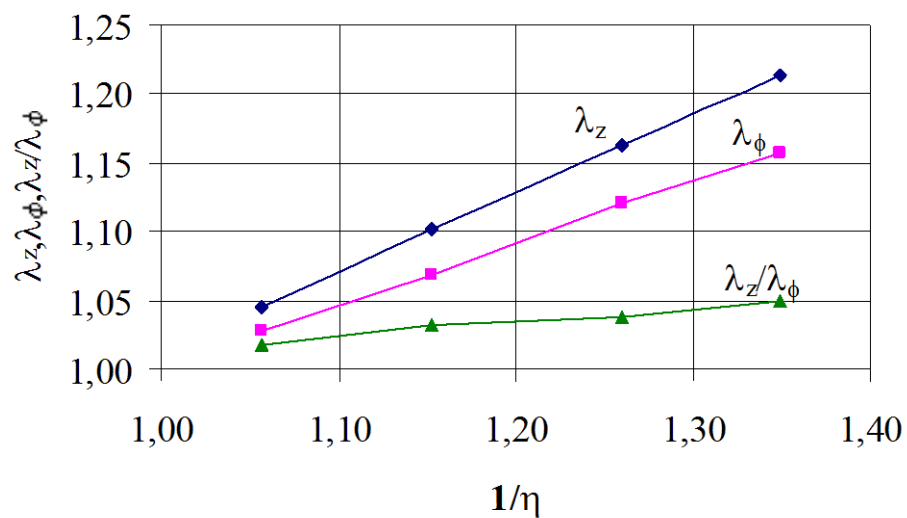


Рис. 2.26. Зависимости  $\lambda_z$ ,  $\lambda_\phi$ ,  $\lambda_z/\lambda_\phi$  для кубика, осаженного вдоль радиального направления – оси  $r$

Таблица 2.9

Результаты осадки кубического образца вдоль тангенциального направления

| P, кН | h, мм | a <sub>r</sub> , мм | a <sub>z</sub> , мм | ε, % | 1/η  | λ <sub>r</sub> | λ <sub>z</sub> | λ <sub>r</sub> /λ <sub>z</sub> |
|-------|-------|---------------------|---------------------|------|------|----------------|----------------|--------------------------------|
| 0     | 10,06 | 10,03               | 9,89                | 0,0  |      |                |                |                                |
| 90    | 9,93  | 10,1                | 9,97                | 1,3  | 1,01 | 1,01           | 1,01           | 0,999                          |
| 110   | 9,7   | 10,23               | 10,14               | 3,6  | 1,04 | 1,02           | 1,03           | 0,995                          |
| 130   | 9,02  | 10,66               | 10,46               | 10,3 | 1,12 | 1,06           | 1,06           | 1,005                          |
| 150   | 8,29  | 11,16               | 10,93               | 17,6 | 1,21 | 1,11           | 1,11           | 1,007                          |
| 170   | 7,59  | 11,87               | 11,42               | 24,6 | 1,33 | 1,18           | 1,15           | 1,025                          |

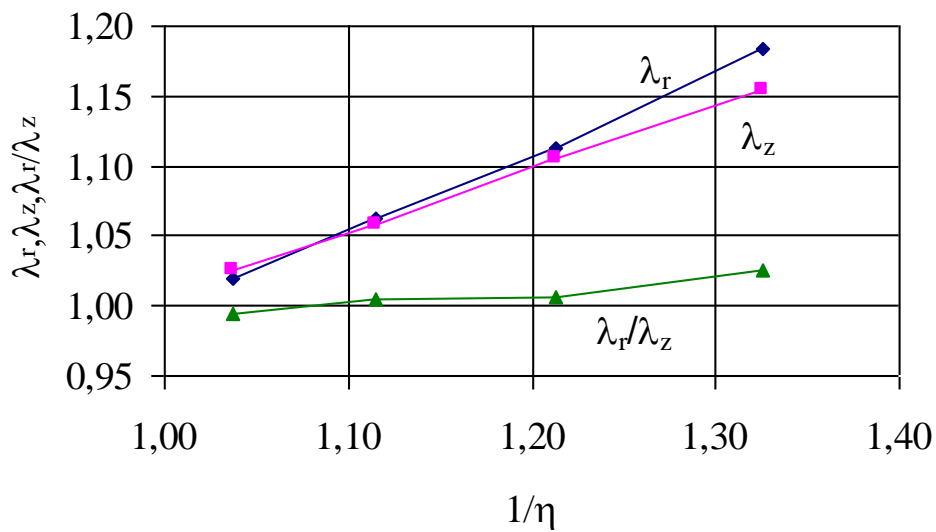


Рис. 2.27. Зависимости  $\lambda_r$ ,  $\lambda_z$ ,  $\lambda_r/\lambda_z$  для куба, осаженного вдоль тангенциального направления – оси  $\varphi$

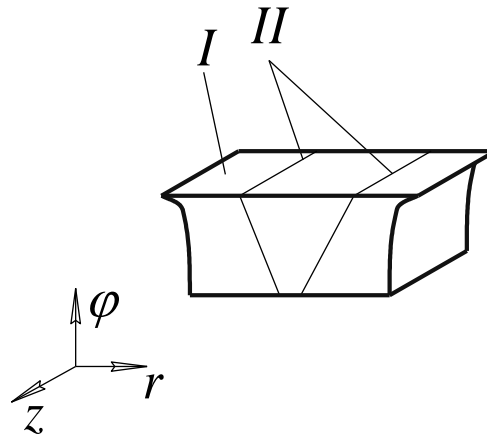


Рис. 2.28. Эскиз разрушенного образца: I – сколотый кубический образец, II – плоскости скола

## 2.5. Анализ напряженного состояния образцов при осадке в различных направлениях

Для определения сопротивления металла деформации образцов в различных направлениях и при различных деформациях фиксировали силу осадки в конечный момент деформирования. Перед деформацией определяли объем образцов  $V = a_{r0} \cdot a_{\varphi 0} \cdot a_{z0}$ , по высоте образца после каждого этапа деформирования определяли площадь контактной поверхности  $F = \frac{V}{h}$ , а сопротивление металла деформации определяли как

$\sigma_s = \frac{P}{F}$ . Таким образом на каждом этапе деформирования определено сопротивление деформации в каждом из трех взаимно перпендикулярных

направлений в трубе ( $\sigma_{sr}$  – в радиальном направлении,  $\sigma_{s\phi}$  – в тангенциальном направлении,  $\sigma_{sz}$  – в продольном направлении). Полученные данные приведены на рис. 2.29.

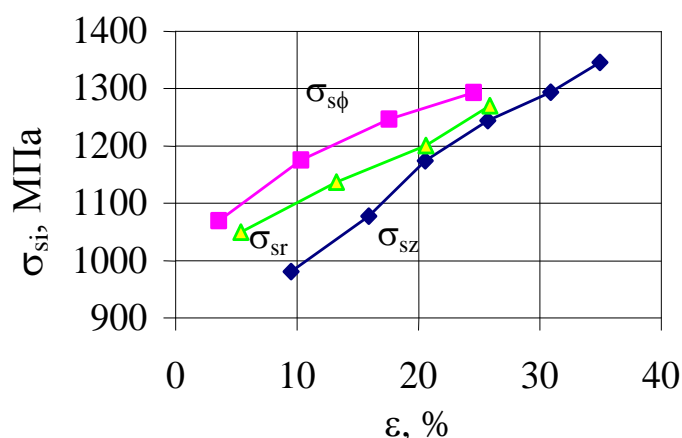


Рис. 2.29. Сопротивление металла деформации в различных направлениях

Как видно из графиков, титановый сплав Grade 9 интенсивно упрочняется при небольших степенях деформации. Этот процесс развивается примерно до степени деформации, равной 20%, после чего интенсивность возрастания сопротивления деформации имеет тенденцию к снижению, что характерно для многих цветных металлов и их сплавов. Однако в продольном направлении интенсивный рост сопротивления деформации продолжается, и кривая все ближе приближается к кривой упрочнения металла в радиальном направлении, хотя при малых степенях деформации  $\sigma_{sz}$  значительно меньше  $\sigma_{sr}$ . Кривая упрочнения металла в направлении оси  $\phi$  лежит выше обеих кривых, что говорит о наибольшем сопротивлении металла деформации в этом направлении. Этот факт подтверждает эффект затрудненного течения металла в тангенциальном направлении, отмеченный выше. При анализе деформированного состояния отмечено, что металл течет в продольном и радиальном направлении приблизительно одинаково, что не совпадает со значительно меньшими значениями  $\sigma_{sz}$  по сравнению с  $\sigma_{sr}$ .

Кривые упрочнения аппроксимировали зависимостями вида (результат - в МПа)

$$\sigma_s = a + b \cdot \varepsilon^c,$$

где  $\varepsilon = \left( \frac{\Delta h}{h_0} \right) \cdot 100$  - относительное обжатие, выраженное в процентах;

$a, b, c$  – коэффициенты, ( $a = \sigma_{0,2}$ ).

Определение этих коэффициентов производилось по следующей схеме. В соответствии с уравнением регрессии назначали коэффициент  $a$ , затем методом наименьших квадратов определяли коэффициенты  $b$  и  $c$ ,

рассчитывали коэффициент корреляции, затем расчет повторяли для другого значения коэффициента  $a$ . В качестве наилучшего варианта выбирали то значение  $a$ , применение которого приводило к наибольшему значению коэффициента корреляции. В результате достигнуты высокие значения от 0,9960 до 0,999. Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  приведены в табл. 2.10.

С помощью найденных значений сопротивления деформации для различных направлений по формулам (2.4) – (2.6) определены параметры анизотропии. Их численные значения в начальный момент деформирования ( $\varepsilon=5\%$ ) приведены на рис. 2.30.

Таблица 2.10

Коэффициенты уравнения регрессии кривых упрочнения

| Направление осадки  | $a$ , МПа | $b$ , МПа | $c$   |
|---------------------|-----------|-----------|-------|
| Вдоль оси $z$       | 600       | 115,0     | 0,526 |
| Вдоль оси $r$       | 850       | 84,6      | 0,483 |
| Вдоль оси $\varphi$ | 800       | 180,0     | 0,315 |

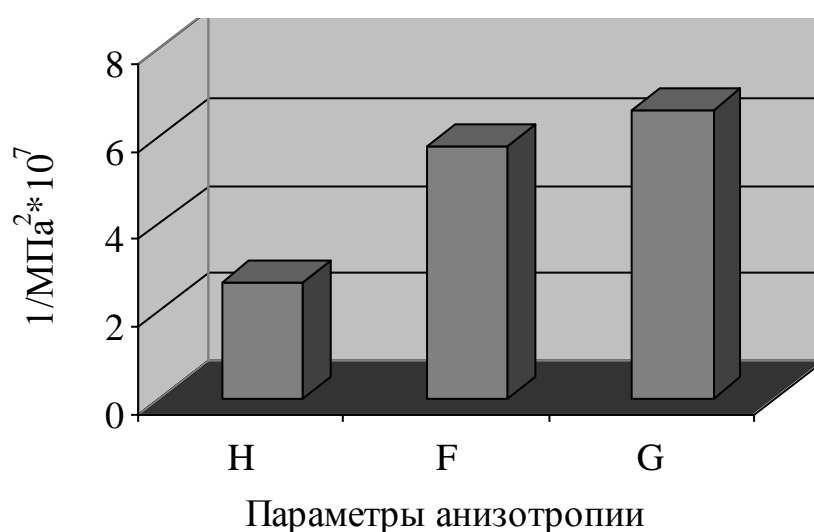


Рис. 2.30. Значения параметров анизотропии в начальный момент деформирования

Применение теории пластической деформации анизотропных материалов помогло решить довольно много практических задач [71-74], поэтому выявленные зависимости могут быть применены при расчете технологических процессов деформации титановых сплавов.

### 3. ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ С ГПУ РЕШЕТКОЙ

#### 3.1. Преобразование девиатора напряжений при развороте системы координат для металлов с ГПУ решеткой

Титан и  $\alpha$ -сплавы на его основе являются материалами с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой, кристаллит которой представляет собой призму, в основании которой находится правильный шестиугольник (рис. 3.1).

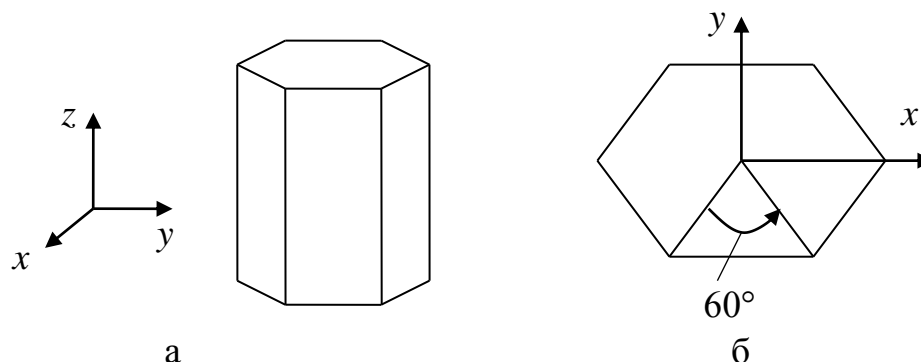


Рис. 3.1. Кристаллит с ГПУ решеткой в системе координат (а), иллюстрация поворота шестигранной призмы вокруг оси симметрии (б)

Из рис. 3.1 видно, что кристаллит в направлении оси  $z$  имеет симметрию шестого порядка, а в направлениях осей  $x$ ,  $y$  – симметрию второго порядка. При повороте призмы вокруг оси  $z$  на угол  $60^\circ$  или вокруг любой из осей  $x$  и  $y$  на угол  $180^\circ$  ее грани занимают первоначальное положение. Этот факт и был использован для упрощения теории пластической деформации анизотропного материала.

Условие текучести Р. Хилла (1.9) можно представить в следующем виде:

$$H(S_{xx} - S_{yy})^2 + F(S_{yy} - S_{zz})^2 + G(S_{zz} - S_{xx})^2 + 2N \cdot S_{xy}^2 + 2L \cdot S_{yz}^2 + 2M \cdot S_{zx}^2 = 1. \quad (3.1)$$

Вследствие наличия симметрии в кристаллите поворот системы координат вокруг осей  $x$  или  $y$  на  $180^\circ$  или вокруг оси  $z$  на  $60^\circ$  не приведет к изменению уравнения (3.1).

Перерасчет компонентов девиатора напряжений при повороте системы координат вокруг оси  $z$  на  $60^\circ$  производили по формуле, применяемой в тензорном анализе:

$$S_{ij} = a_{ii} a_{jj} S_{i'j'}, \quad (3.2)$$



где  $a_{ii'}(i, i' = x, y, z)$ ,  $a_{jj'}(j, j' = x, y, z)$  – компоненты матрицы перехода, значения которых приведены в табл. 3.1. Девиатор напряжений  $S_{ij}$  подчиняется законам парности касательных напряжений.

Осуществим преобразование компонент девиатора напряжений в точке тела при повороте системы координат вокруг оси  $x$  на  $180^\circ$ .

Исходная и повернутая на угол  $\varphi$  вокруг оси  $x$  системы координат показаны на рис. 3.2.

Таблица 3.1

Матрица поворота системы координат вокруг одной из ее осей на произвольный угол  $\varphi$

|     | $x'$      | $y'$      | $z'$      |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| $x$ | $a_{xx'}$ | $a_{xy'}$ | $a_{xz'}$ |
| $y$ | $a_{yx'}$ | $a_{yy'}$ | $a_{yz'}$ |
| $z$ | $a_{zx'}$ | $a_{zy'}$ | $a_{zz'}$ |

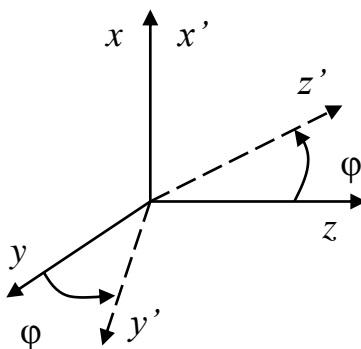


Рис. 3.2. Поворот системы координат на произвольный угол  $\varphi$  вокруг оси  $x$

Поворот осуществляется против часовой стрелки, при этом ось  $x$  занимает положение оси  $x'$ , ось  $y$  – оси  $y'$ , ось  $z$  – оси  $z'$  (рис. 3.2). При этом матрица поворота (табл. 3.1) преобразуется к виду, приведенному в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Матрица поворота системы координат вокруг оси  $x$  на угол  $\varphi$

|     | $x'$          | $y'$                    | $z'$                     |
|-----|---------------|-------------------------|--------------------------|
| $x$ | $a_{xx'} = 1$ | $a_{xy'} = 0$           | $a_{xz'} = 0$            |
| $y$ | $a_{yx'} = 0$ | $a_{yy'} = \cos\varphi$ | $a_{yz'} = -\sin\varphi$ |
| $z$ | $a_{zx'} = 0$ | $a_{zy'} = \sin\varphi$ | $a_{zz'} = \cos\varphi$  |

Перерасчет компонентов девиатора напряжений произведем по формуле (3.2) с проверкой следующих положений:

1. Нормальные составляющие тензора напряжений при повороте на  $180^\circ$  остаются без изменений.
2. Касательные составляющие, содержащие в индексах  $x$ , должны поменять знак.
3. Закон парности касательных напряжений должен выполняться.

Произведем перерасчет компонентов девиатора напряжений по формуле (3.2).

$$S_{xx} = (a_{xx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{xy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{xz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{xz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (1 \cdot 1 \cdot S_{x'x'} + 0 + 0) + (0 + 0) + (0 + 0) + (0 + 0) = S_{x'x'}.$$

$$S_{xy} = (a_{xx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{xy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{xz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{xz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + 0 + 0) + (0 + 0) + (0 + 0) + (1 \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'y'} + 1 \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{x'z'}) = -S_{x'y'}.$$

$$S_{xz} = (a_{xx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{xy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{xz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{xz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + 0 + 0) + (0 + 0) + (0 + 0) + (1 \cdot \sin\varphi \cdot S_{x'y'} + 1 \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'z'}) = -S_{x'z'}.$$

$$S_{yy} = (a_{yx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{yz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'y'} + \sin\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{z'z'}) + (\cos\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{y'z'} + 0) + \\ + (0 + (-\sin\varphi) \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'y'}) + (0 + 0) = S_{y'y'}.$$

$$S_{yx} = (a_{yx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{yz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + 0 + 0) + (0 + \cos\varphi \cdot 1 \cdot S_{y'x'}) + ((-\sin\varphi) \cdot 1 \cdot S_{z'y'} + 0) + (0 + 0) = -S_{y'x'}.$$

$$S_{yz} = (a_{yx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{yz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{y'y'} + (-\sin\varphi) \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'z'}) + (\cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'z'} + 0) + \\ + (0 + (-\sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cdot S_{z'y'}) + (0 + 0) = S_{y'z'}.$$

$$S_{zz} = (a_{zx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{zz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + \sin\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{y'y'} + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'z'}) + (\sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'z'} + 0) + \\ + (0 + \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{z'y'}) + (0 + 0) = S_{z'z'}.$$

$$S_{zx} = (a_{zx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{zz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + 0 + 0) + (0 + \sin\varphi \cdot 1 \cdot S_{y'x'}) + (\cos\varphi \cdot 1 \cdot S_{z'x'} + 0) + (0 + 0) = -S_{z'x'}.$$

$$S_{zy} = (a_{zx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'x'}) + \\ + (a_{zz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\ = (0 + \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'y'} + \cos\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{z'z'}) + (\sin\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{y'z'} + 0) + \\ + (0 + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'y'}) + (0 + 0) = S_{z'y'}.$$

Полученные результаты вычислений согласуются с тремя утверждениями, приведенными выше.

Осуществим преобразование компонент девиатора напряжений в точке тела при повороте системы координат вокруг оси  $y$  на  $180^\circ$ .

Исходная и повернутая на угол  $\varphi$  вокруг оси  $y$  системы координат показаны на рис. 3.3.

Поворот осуществляется против часовой стрелки, при этом ось  $x$  занимает положение оси  $x'$ , ось  $y$  – оси  $y'$ , ось  $z$  – оси  $z'$  (рис. 3.3). При этом матрица поворота (табл. 3.1) преобразуется к виду, приведенному в табл. 3.3.

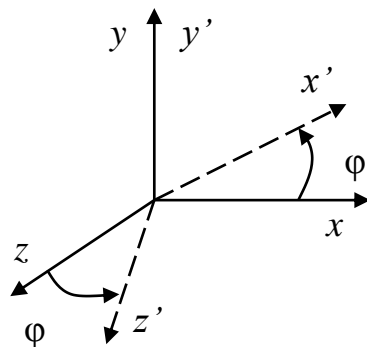


Рис. 3.3. Поворот системы координат на произвольный угол  $\varphi$  вокруг оси  $y$

Перерасчет компонентов девиатора напряжений произведем по формуле (3.2) с проверкой следующих положений:

1. Нормальные составляющие тензора напряжений при повороте на  $180^\circ$  остаются без изменений.
2. Касательные составляющие, содержащие в индексах  $y$ , должны поменять знак.
3. Закон парности касательных напряжений должен выполняться.

Таблица 3.3

Матрица поворота системы координат вокруг оси  $y$  на угол  $\varphi$

|     | $x'$                     | $y'$          | $z'$                    |
|-----|--------------------------|---------------|-------------------------|
| $x$ | $a_{xx} := \cos\varphi$  | $a_{xy} := 0$ | $a_{xz} := \sin\varphi$ |
| $y$ | $a_{yx} := 0$            | $a_{yy} := 1$ | $a_{yz} := 0$           |
| $z$ | $a_{zx} := -\sin\varphi$ | $a_{zy} := 0$ | $a_{zz} := \cos\varphi$ |

Произведем перерасчет компонентов девиатора напряжений по формуле (3.2).

$$\begin{aligned}
 S_{xx} &= (a_{xx}a_{xx}S_{x'x'} + a_{xy}a_{xy}S_{y'y'} + a_{xz}a_{xz}S_{z'z'}) + (a_{xy}a_{xz}S_{y'z'} + a_{xy}a_{xx}S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{xz}a_{xx}S_{z'x'} + a_{xz}a_{xy}S_{z'y'}) + (a_{xx}a_{xy}S_{x'y'} + a_{xx}a_{xz}S_{x'z'}) = \\
 &= (\cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'x'} + 0 + \sin\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{z'z'}) + (0 + 0) + (\sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'x'} + 0) + \\
 &+ (0 + \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{x'z'}) = S_{x'x'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{xy} &= (a_{xx}a_{yx}S_{x'x'} + a_{xy}a_{yy}S_{y'y'} + a_{xz}a_{yz}S_{z'z'}) + (a_{xy}a_{yz}S_{y'z'} + a_{xy}a_{yx}S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{xz}a_{yx}S_{z'x'} + a_{xz}a_{yy}S_{z'y'}) + (a_{xx}a_{yy}S_{x'y'} + a_{xx}a_{yz}S_{x'z'}) = \\
 &= (0 + 0 + 0) + (0 + 0) + (0 + \sin\varphi \cdot 1 \cdot S_{z'y'}) + (\cos\varphi \cdot 1 \cdot S_{x'y'} + 0) = -S_{x'y'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{xz} &= (a_{xx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{xz} \cdot a_{zx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{xz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{zx} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= (\cos\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{x'x'} + 0 + \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'z'}) + (0 + 0) + ((-\sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cdot S_{z'x'} + 0) + \\
&+ (0 + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'z'}) = S_{x'z'}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{yy} &= (a_{yx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{yx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{yz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= (0 + 1 \cdot 1 \cdot S_{y'y'} + 0) + (0 + 0) + (0 + 0) + (0 + 0) = S_{y'y'}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{yx} &= (a_{yx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{xx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{yz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= (0 + 0 + 0) + (1 \cdot \sin\varphi \cdot S_{y'z'} + 1 \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'x'}) + (0 + 0) + (0 + 0) = -S_{y'x'}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{yz} &= (a_{yx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{zx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{yz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= (0 + 0 + 0) + (1 \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'z'} + 1 \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{y'x'}) + (0 + 0) + (0 + 0) = -S_{y'z'}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{zz} &= (a_{zx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{zx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{zz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= ((-\sin\varphi) \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{x'x'} + 0 + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'z'}) + (0 + 0) + \\
&+ (\cos\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{z'x'} + 0) + (0 + (-\sin\varphi) \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'z'}) = S_{z'z'}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{zx} &= (a_{zx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{xx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{zz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= ((-\sin\varphi) \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'x'} + 0 + \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{z'z'}) + (0 + 0) + (\cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{z'x'} + 0) + \\
&+ (0 + (-\sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cdot S_{x'z'}) = S_{z'x'}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{zy} &= (a_{zx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{yx} \cdot S_{y'x'}) + \\
&+ (a_{zz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\
&= (0 + 0 + 0) + (0 + 0) + (0 + \cos\varphi \cdot 1 \cdot S_{z'y'}) + ((-\sin\varphi) \cdot 1 \cdot S_{y'x'} + 0) = -S_{z'y'}.
\end{aligned}$$

Осуществим преобразование компонент девиатора напряжений в точке тела при повороте системы координат вокруг оси  $z$  на  $60^\circ$ .

Исходная и повернутая на угол  $\varphi$  вокруг оси  $z$  системы координат показаны на рис. 3.4.

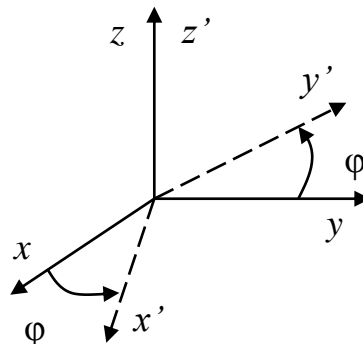


Рис. 3.4. Поворот системы координат на произвольный угол  $\varphi$  вокруг оси  $z$

Поворот осуществляется против часовой стрелки, при этом ось  $x$  занимает положение оси  $x'$ , ось  $y$  — оси  $y'$ , ось  $z$  — оси  $z'$  (рис. 3.4).

Матрица поворота (табл. 3.1) преобразуется к виду, приведенному в табл. 3.4.

Перерасчет компонентов девиатора напряжений произведем при повороте системы координат на угол  $60^\circ$  вокруг оси  $z$  по формуле (3.2).

Таблица 3.4

Матрица поворота системы координат вокруг оси  $z$  на угол  $\varphi$

|     | $x'$                   | $y'$                    | $z'$         |
|-----|------------------------|-------------------------|--------------|
| $x$ | $a_{xx} = \cos\varphi$ | $a_{xy} = -\sin\varphi$ | $a_{xz} = 0$ |
| $y$ | $a_{yx} = \sin\varphi$ | $a_{yy} = \cos\varphi$  | $a_{yz} = 0$ |
| $z$ | $a_{zx} = 0$           | $a_{zy} = 0$            | $a_{zz} = 1$ |

$$\begin{aligned}
 S_{xx} &= (a_{xx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{xy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{xz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{xz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\
 &= (\cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'x'} + (-\sin\varphi) \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{y'y'} + 0) + (0 + (-\sin\varphi) \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (0 + 0) + (\cos\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{x'y'} + 0) = \cos^2\varphi \cdot S_{x'x'} + \sin^2\varphi \cdot S_{y'y'} - \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'x'} - \\
 &\sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'y'} = \\
 &= \cos^2\varphi \cdot S_{x'x'} + \sin^2\varphi \cdot S_{y'y'} - \sin 2\varphi \cdot S_{x'y'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{xy} &= (a_{xx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{xy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{xz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{xz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\
 &= (\cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{x'x'} + (-\sin\varphi) \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'y'} + 0) + (0 + (-\sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cdot S_{y'x'}) + (0 + 0) + \\
 &+ (\cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'y'} + 0) = \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'x'} - \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'y'} - \sin^2\varphi \cdot S_{y'x'} + \cos^2\varphi \cdot S_{x'y'} = \\
 &= 0,5\sin 2\varphi \cdot S_{x'x'} - 0,5\sin 2\varphi \cdot S_{y'y'} + \cos 2\varphi \cdot S_{x'y'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{xz} &= (a_{xx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{xy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{xz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{xy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{xy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{xz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{xz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{xx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{xx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\
 &= (0 + 0 + 0) + ((-\sin\varphi) \cdot 1 \cdot S_{y'z'} + 0) + (0 + 0) + (0 + \cos\varphi \cdot 1 \cdot S_{x'z'}) = \cos\varphi \cdot S_{x'z'} - \sin\varphi \cdot S_{y'z'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{yy} &= (a_{yx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{yz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\
 &= (\sin\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{x'x'} + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'y'} + 0) + (0 + \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot S_{y'x'}) + (0 + 0) + \\
 &+ (\sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'y'} + 0) = \sin^2\varphi \cdot S_{x'x'} + \cos^2\varphi \cdot S_{y'y'} + \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'x'} + \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'y'} = \\
 &= \sin^2\varphi \cdot S_{x'x'} + \cos^2\varphi \cdot S_{y'y'} + \sin 2\varphi \cdot S_{x'y'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{yx} &= (a_{yx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{yz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\
 &= (\sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'x'} + \cos\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{y'y'} + 0) + (0 + \cos\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'x'}) + (0 + 0) + \\
 &+ (\sin\varphi \cdot (-\sin\varphi) \cdot S_{x'y'} + 0) = \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{x'x'} - \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot S_{y'y'} + \cos^2\varphi \cdot S_{y'x'} - \sin^2\varphi \cdot S_{x'y'} = \\
 &= 0,5\sin 2\varphi \cdot S_{x'x'} - 0,5\sin 2\varphi \cdot S_{y'y'} + \cos 2\varphi \cdot S_{y'x'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{yz} &= (a_{yx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{yy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{yz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{yy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{yy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{yz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{yz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{yx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{yx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) = \\
 &= (0 + 0 + 0) + (\cos\varphi \cdot 1 \cdot S_{y'z'} + 0) + (0 + 0) + (0 + \sin\varphi \cdot 1 \cdot S_{x'z'}) = \cos\varphi \cdot S_{y'z'} + \sin\varphi \cdot S_{x'z'}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{zz} &= (a_{zx} \cdot a_{zx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{zy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{zz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{zz} \cdot S_{y'x'}) + \\
 &+ (a_{zz} \cdot a_{zx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{zy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{zy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{zz} \cdot S_{x'z'}) =
 \end{aligned}$$

$$=(0+0+1 \cdot 1 \cdot S_{z'z'})+(0+0)+(0+0)+(0+0)=S_{z'z'}.$$

$$\begin{aligned} S_{zx} &= (a_{zx} \cdot a_{xx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{xy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{xz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{xz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{xx} \cdot S_{y'x'}) + \\ &+ (a_{zz} \cdot a_{xx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{xy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{xy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{xz} \cdot S_{x'z'}) = \\ &= (0+0+0)+(0+0)+(1 \cdot \cos \varphi \cdot S_{x'x'} + 1 \cdot (-\sin \varphi) \cdot S_{z'y'}) + (0+0) = \cos \varphi \cdot S_{x'x'} - \sin \varphi \cdot S_{y'z'}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{zy} &= (a_{zx} \cdot a_{yx} \cdot S_{x'x'} + a_{zy} \cdot a_{yy} \cdot S_{y'y'} + a_{zz} \cdot a_{yz} \cdot S_{z'z'}) + (a_{zy} \cdot a_{yz} \cdot S_{y'z'} + a_{zy} \cdot a_{yx} \cdot S_{y'x'}) + \\ &+ (a_{zz} \cdot a_{yx} \cdot S_{z'x'} + a_{zz} \cdot a_{yy} \cdot S_{z'y'}) + (a_{zx} \cdot a_{yy} \cdot S_{x'y'} + a_{zx} \cdot a_{yz} \cdot S_{x'z'}) = \\ &= (0+0+0)+(0+0)+(1 \cdot \sin \varphi \cdot S_{x'x'} + 1 \cdot \cos \varphi \cdot S_{z'y'}) + (0+0) = \sin \varphi \cdot S_{x'x'} + \cos \varphi \cdot S_{y'z'}. \end{aligned}$$

В результате вычислений получаем, что компоненты девиатора напряжений будут равны:

$$S_{xx} = \cos^2 \varphi \cdot S_{x'x'} + \sin^2 \varphi \cdot S_{y'y'} - \sin 2\varphi \cdot S_{x'y'} = \frac{1}{4} S_{x'x'} + \frac{3}{4} S_{y'y'} - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{x'y'};$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2} \cos 2\varphi \cdot S_{x'x'} - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \cdot S_{y'y'} - \cos 2\varphi \cdot S_{x'y'} = \frac{\sqrt{3}}{4} S_{x'x'} - \frac{\sqrt{3}}{4} S_{y'y'} - \frac{1}{2} S_{x'y'};$$

$$S_{xz} = \cos \varphi \cdot S_{x'z'} - \sin \varphi \cdot S_{y'z'} = \frac{1}{2} S_{x'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{y'z'};$$

$$S_{yy} = \sin^2 \varphi \cdot S_{x'x'} + \cos^2 \varphi \cdot S_{y'y'} + \sin 2\varphi \cdot S_{x'y'} = \frac{3}{4} S_{x'x'} + \frac{1}{4} S_{y'y'} + \frac{\sqrt{3}}{2} S_{x'y'};$$

$$S_{yx} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi \cdot S_{x'x'} - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \cdot S_{y'y'} - \sin 2\varphi \cdot S_{x'y'} = \frac{\sqrt{3}}{4} S_{x'x'} - \frac{\sqrt{3}}{4} S_{y'y'} - \frac{1}{2} S_{x'y'};$$

$$S_{yz} = \cos \varphi \cdot S_{y'z'} - \sin \varphi \cdot S_{x'z'} = \frac{1}{2} S_{y'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{x'z'};$$

$$S_{zz} = S_{z'z'};$$

$$S_{zx} = \cos \varphi \cdot S_{x'z'} - \sin \varphi \cdot S_{y'z'} = \frac{1}{2} S_{x'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{y'z'};$$

$$S_{zy} = \cos \varphi \cdot S_{y'z'} - \sin \varphi \cdot S_{x'z'} = \frac{1}{2} S_{y'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{x'z'}.$$

### 3.2. Преобразование уравнения пластичности теории Хилла для анизотропных материалов с ГПУ решеткой

Проведем преобразование уравнения (3.1) с учетом полученных значений компонентов девиатора напряжений при повороте системы координат на  $60^\circ$  вокруг оси  $z$ . Обозначим  $S_{i'j'} = t_{ij}$ . Значения компонентов девиатора напряжений примут вид:

$$S_{xx} = \cos^2 \varphi \cdot t_{xx} + \sin^2 \varphi \cdot t_{yy} - \sin 2\varphi \cdot t_{xy};$$

$$S_{yy} = \sin^2 \varphi \cdot t_{xx} + \cos^2 \varphi \cdot t_{yy} + \sin 2\varphi \cdot t_{xy};$$

$$S_{zz} = t_{zz};$$

$$S_{yz} = \cos \varphi \cdot t_{yz} + \sin \varphi \cdot t_{xz};$$

$$S_{zx} = -\sin \varphi \cdot t_{yz} + \cos \varphi \cdot t_{zx};$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi \cdot t_{xx} - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \cdot t_{yy} + \cos 2\varphi \cdot t_{xy}.$$

$$\text{При } \varphi=60^\circ \quad \sin \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \cos \varphi = \frac{1}{2}, \quad \sin^2 \varphi = \frac{3}{4}, \quad \cos^2 \varphi = \frac{1}{4}, \quad \sin 2\varphi = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$\cos 2\varphi = -\frac{1}{2}. \text{ Подставив эти значения, получаем:}$$

$$S_{xx} = \frac{1}{4} t_{xx} + \frac{3}{4} t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{2} t_{xy};$$

$$S_{yy} = \frac{3}{4} t_{xx} + \frac{1}{4} t_{yy} + \frac{\sqrt{3}}{2} t_{xy};$$

$$S_{zz} = t_{zz};$$

$$S_{yz} = \frac{1}{2} t_{yz} + \frac{\sqrt{3}}{2} t_{xz};$$

$$S_{zx} = -\frac{\sqrt{3}}{2} t_{yz} + \frac{1}{2} t_{zx};$$

$$S_{xy} = \frac{\sqrt{3}}{4} t_{xx} - \frac{\sqrt{3}}{4} t_{yy} - \frac{1}{2} t_{xy}.$$

Запишем компоненты уравнения (3.1) через компоненты девиатора напряжений в новой системе координат:

$$\begin{aligned} (S_{xx} - S_{yy})^2 &= \left( \frac{1}{4} t_{xx} + \frac{3}{4} t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{2} t_{xy} - \frac{3}{4} t_{xx} - \frac{1}{4} t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{2} t_{xy} \right)^2 = \\ &= \left( -\frac{1}{2} t_{xx} + \frac{1}{2} t_{yy} - \sqrt{3} t_{xy} \right)^2 = \frac{1}{4} t_{xx}^2 + \frac{1}{4} t_{yy}^2 + 3 t_{xy}^2 - \frac{1}{2} t_{xx} \cdot t_{yy} + \sqrt{3} t_{xx} \cdot t_{xy} - \sqrt{3} t_{yy} \cdot t_{xy}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(S_{yy} - S_{zz})^2 &= \left( \frac{3}{4}t_{xx} + \frac{1}{4}t_{yy} + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{xy} - t_{zz} \right)^2 = \frac{9}{16}t_{xx}^2 + \frac{1}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 + t_{zz}^2 + \\
&+ 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2}t_{xx} \cdot t_{yy} + 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{xx} \cdot t_{xy} - 2 \cdot \frac{3}{4}t_{xx} \cdot t_{zz} + 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yy} \cdot t_{xy} - 2 \cdot \frac{1}{4}t_{yy} \cdot t_{zz} - \\
&- 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{xy} \cdot t_{zz} = \frac{9}{16}t_{xx}^2 + \frac{1}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 + t_{zz}^2 + \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} + \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} - \frac{3}{2}t_{xx} \cdot t_{zz} - \\
&+ \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy} - \frac{1}{2}t_{yy} \cdot t_{zz} - \sqrt{3}t_{xy} \cdot t_{zz}; \\
(S_{zz} - S_{xx})^2 &= \left( t_{zz} - \frac{1}{4}t_{xx} - \frac{3}{4}t_{yy} + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{zz} \right)^2 = t_{zz}^2 + \frac{1}{16}t_{xx}^2 + \frac{9}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 - 2 \cdot \frac{1}{4}t_{zz} \cdot t_{xx} - \\
&- 2 \cdot \frac{3}{4}t_{zz} \cdot t_{yy} + 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{zz} \cdot t_{xy} + 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{3}{4}t_{xx} \cdot t_{yy} - 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{xx} \cdot t_{xy} - 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yy} \cdot t_{xy} = \\
&= t_{zz}^2 + \frac{1}{16}t_{xx}^2 + \frac{9}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 - \frac{1}{2}t_{zz} \cdot t_{xx} - \frac{3}{2}t_{zz} \cdot t_{yy} + \sqrt{3}t_{zz} \cdot t_{xy} + \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \\
&- \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} - \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy}; \\
S_{xy}^2 &= \left( \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} - \frac{1}{2}t_{xy} \right)^2 = \frac{3}{16}t_{xx}^2 + \frac{3}{16}t_{yy}^2 + \frac{1}{4}t_{xy}^2 - 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{yy} - \\
&- 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{1}{2}t_{xx} \cdot t_{xy} + 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{1}{2}t_{yy} \cdot t_{xy} = \frac{3}{16}t_{xx}^2 + \frac{3}{16}t_{yy}^2 + \frac{1}{4}t_{xy}^2 - \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \\
&- \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} + \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy}; \\
S_{yz}^2 &= \left( \frac{1}{2}t_{yz} + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{zx} \right)^2 = \frac{1}{4}t_{yz}^2 + \frac{3}{4}t_{zx}^2 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx} = \\
&= \frac{1}{4}t_{yz}^2 + \frac{3}{4}t_{zx}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}; \\
S_{yz}^2 &= \left( -\frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} + \frac{1}{2}t_{zx} \right)^2 = \frac{3}{4}t_{yz}^2 + \frac{1}{4}t_{zx}^2 - 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{2}t_{yz} \cdot t_{zx} = \\
&= \frac{3}{4}t_{yz}^2 + \frac{1}{4}t_{zx}^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}.
\end{aligned}$$

После подстановки полученных выражений в формулу (3.1) она преобразуется к виду:



$$\begin{aligned}
& H(S_{xx} - S_{yy})^2 + F(S_{yy} - S_{zz})^2 + G(S_{zz} - S_{xx})^2 + 2N \cdot S_{xy}^2 + 2L \cdot S_{yz}^2 + 2M \cdot S_{zx}^2 = \\
& = H\left(\frac{1}{4}t_{xx}^2 + \frac{1}{4}t_{yy}^2 + 3t_{xy}^2 - \frac{1}{2}t_{xx} \cdot t_{yy} + \sqrt{3}t_{xx} \cdot t_{xy} - \sqrt{3}t_{yy} \cdot t_{xy}\right) + \\
& + F\left(\frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} + \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} - \frac{3}{2}t_{xx} \cdot t_{zz} + \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy} - \frac{1}{2}t_{yy}t_{zz} - \sqrt{3}t_{xy} \cdot t_{zz} + \right. \\
& \left. + \frac{9}{16}t_{xx}^2 + \frac{1}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 + t_{zz}^2\right) + \\
& + G\left(-\frac{1}{2}t_{zz} \cdot t_{xx} - \frac{3}{2}t_{zz} \cdot t_{yy} + \sqrt{3}t_{zz} \cdot t_{xy} + \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx}t_{xy} - \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy} + \right. \\
& \left. + t_{zz}^2 + \frac{1}{16}t_{xx}^2 + \frac{9}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2\right) + \\
& + 2N\left(\frac{3}{16}t_{xx}^2 + \frac{3}{16}t_{yy}^2 + \frac{1}{4}t_{xy}^2 - \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy}\right) + \\
& + 2L\left(\frac{1}{4}t_{yz}^2 + \frac{3}{4}t_{zx}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right) + 2M\left(\frac{3}{4}t_{yz}^2 + \frac{1}{4}t_{zx}^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right).
\end{aligned}$$

Вследствие того, что и в повернутой системе координат уравнение (3.1) не изменит своего вида, то его отдельные члены будут записаны точно также. Исходя из этого, можно составить следующие равенства для отдельных членов уравнения (3.1):

$$\begin{aligned}
& H(S_{xx} - S_{yy})^2 = H(t_{xx} - t_{yy})^2 - H(t_{xx}^2 - 2t_{xx} \cdot t_{yy} + t_{yy}^2) + \\
& + H\left(\frac{1}{4}t_{xx}^2 + \frac{1}{4}t_{yy}^2 + 3t_{xy}^2 - \frac{1}{2}t_{xx} \cdot t_{yy} + \sqrt{3}t_{xx} \cdot t_{xy} - \sqrt{3}t_{yy} \cdot t_{xy}\right) = \quad (3.3) \\
& = H(t_{xx} - t_{yy})^2 + H\left(-\frac{3}{4}t_{xx}^2 - \frac{3}{4}t_{yy}^2 + \frac{3}{2}t_{xx} \cdot t_{yy} + 3t_{xy}^2 + \sqrt{3}t_{xx} \cdot t_{xy} - \sqrt{3}t_{yy} \cdot t_{xy}\right); \\
& F(S_{yy} - S_{zz})^2 = F(t_{yy} - t_{zz})^2 + F(-t_{yy}^2 + 2t_{yy} \cdot t_{zz} - t_{zz}^2) + \\
& + F\left(\frac{9}{16}t_{xx}^2 + \frac{1}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 + t_{zz}^2 - \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} + \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} - \frac{3}{2}t_{xx} \cdot t_{zz} + \right. \\
& \left. + \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy} - \frac{1}{2}t_{yy}t_{zz} - \sqrt{3}t_{xy}t_{zz}\right) = F(t_{yy} - t_{zz})^2 + F\left(\frac{9}{16}t_{xx}^2 - \frac{15}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 + \right. \\
& \left. + \frac{3}{2}t_{yy}t_{zz} + \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} + \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} - \frac{3}{2}t_{xx} \cdot t_{zz} + \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy} - \sqrt{3}t_{xy}t_{zz}\right); \quad (3.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G(S_{zz} - S_{xx})^2 &= G(t_{zz} - t_{xx})^2 + G(-t_{zz}^2 + 2t_{zz} \cdot t_{xx} - t_{xx}^2) + \\
&+ G\left(t_{zz}^2 + \frac{1}{16}t_{xx}^2 + \frac{9}{16}t_{yy}^2 + \frac{3}{4}t_{xy}^2 - \frac{1}{2}t_{zz} \cdot t_{xx} - \frac{3}{2}t_{zz} \cdot t_{yy} + \sqrt{3}t_{zz} \cdot t_{xy} + \right. \\
&+ \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx}t_{xy} - \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{yy}t_{xy}\left.)\right) = G(t_{zz} - t_{xx})^2 + G\left(-\frac{15}{16}t_{xx}^2 + \frac{9}{16}t_{yy}^2 + \right. \\
&+ \frac{3}{4}t_{xy}^2 + \frac{3}{2}t_{zz} \cdot t_{xx} - \frac{3}{2}t_{zz} \cdot t_{yy} + \sqrt{3}t_{zz} \cdot t_{xy} + \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx}t_{xy} - \frac{3\sqrt{3}}{4}t_{yy}t_{xy}\left. \right); \quad (3.5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
2N \cdot S_{xy}^2 &= 2N \cdot t_{xy}^2 + 2N(-t_{xy}^2) + 2N\left(\frac{3}{16}t_{xx}^2 + \frac{3}{16}t_{yy}^2 + \frac{1}{4}t_{xy}^2 - \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \right. \\
&- \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} + \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy}\left.)\right) = 2N \cdot t_{xy}^2 + 2N\left(\frac{3}{16}t_{xx}^2 + \frac{3}{16}t_{yy}^2 - \frac{3}{4}t_{xy}^2 - \right. \\
&- \frac{3}{8}t_{xx} \cdot t_{yy} - \frac{\sqrt{3}}{4}t_{xx} \cdot t_{xy} + \frac{\sqrt{3}}{4}t_{yy} \cdot t_{xy}\left. \right); \quad (3.6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
2L \cdot S_{yz}^2 &= 2L \cdot t_{yz}^2 + 2L(-t_{yz}^2) + 2L\left(\frac{1}{4}t_{yz}^2 + \frac{3}{4}t_{zx}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right) = \\
&= 2L \cdot t_{yz}^2 + 2L\left(-\frac{3}{4}t_{yz}^2 + \frac{3}{4}t_{zx}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right); \quad (3.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
2M \cdot S_{zx}^2 &= 2M \cdot t_{zx}^2 + 2M(-t_{zx}^2) + 2M\left(\frac{3}{4}t_{yz}^2 + \frac{1}{4}t_{zx}^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right) = \\
&= 2M \cdot t_{zx}^2 + 2M\left(\frac{3}{4}t_{yz}^2 - \frac{3}{4}t_{zx}^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right). \quad (3.8)
\end{aligned}$$

Уравнения (3.3)–(3.8) в правой части имеют те же по виду выражения, что и в левой части, плюс добавочные компоненты. Для выполнения условия текучести Хилла необходимо, чтобы сумма этих добавочных компонентов была равна 0.

Пусть  $L=M$ , тогда из уравнений (3.7) и (3.8) получим:

$$\begin{aligned}
2L \cdot S_{yz}^2 + 2M \cdot S_{zx}^2 &= 2L \cdot t_{yz}^2 + 2L \cdot t_{zx}^2 + \\
&+ 2L\left(-\frac{3}{4}t_{yz}^2 + \frac{3}{4}t_{zx}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx} + \frac{3}{4}t_{yz}^2 - \frac{3}{4}t_{zx}^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}t_{yz} \cdot t_{zx}\right) = 2L \cdot t_{yz}^2 + 2L \cdot t_{zx}^2.
\end{aligned}$$

Верность полученного выражения доказывается тем, что при  $L$  и  $M$  находятся в скобках одинаковые выражения, но с противоположным знаком, и  $t_{yz}, t_{zx}$  встречаются только в уравнениях (3.7) и (3.8).

Для обращения добавочных компонентов уравнений (3.3)–(3.6) в ноль сложим коэффициенты, стоящие при одних и тех же  $t_{ij}$  и приравняем их к нулю.

$$\begin{aligned}
 1. \quad & t_{xx}^2 \left( -\frac{3}{4}H + \frac{9}{16}F - \frac{15}{16}G + 2 \cdot \frac{3}{16}N \right) = 0, \text{ откуда} \\
 & -12H + 9F - 15G + 6N = 0, \\
 & -4H + 3F - 5G + 2N = 0.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
 2. \quad & t_{yy}^2 \left( -\frac{3}{4}H - \frac{15}{16}F + \frac{9}{16}G + 2 \cdot \frac{3}{16}N \right) = 0, \\
 & -12H - 15F + 9G + 6N = 0, \\
 & -4H - 5F + 3G + 2N = 0.
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Из формул (3.9) и (3.10) следует, что  $F=G$ .

$$\begin{aligned}
 3. \quad & t_{xx} \cdot t_{yy} \left( \frac{3}{2}H + \frac{3}{8}F + \frac{3}{8}G + 2 \cdot \frac{3}{8}N \right) = 0 \\
 & 12H + 3F + 3G - 6N = 0.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 4. \quad & t_{xy}^2 \left( 3H + \frac{3}{4}F + \frac{3}{4}G - 2 \cdot \frac{3}{4}N \right) = 0, \\
 & 12H + 3F + 3G - 6N = 0.
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
 5. \quad & t_{xx} \cdot t_{xy} \left( \sqrt{3} \cdot H + \frac{3\sqrt{3}}{4}F - \frac{\sqrt{3}}{4}G + 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4}N \right) = 0 \\
 & 4\sqrt{3} \cdot H + 3\sqrt{3} \cdot F - \sqrt{3}G - 2\sqrt{3} \cdot N = 0, \\
 & 4H + 3F - G - 2N = 0.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
 6. \quad & t_{yy} \cdot t_{xy} \left( -\sqrt{3} \cdot H + \frac{\sqrt{3}}{4}F - \frac{3\sqrt{3}}{4}G + 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4}N \right) = 0 \\
 & -H + \frac{1}{4}F - \frac{3}{4}G - \frac{1}{2}N = 0, \\
 & 4H - F + 3G - 2N = 0.
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
 7. \quad & t_{yy} \cdot t_{zz} \left( \frac{3}{2}F - \frac{3}{2}G \right) = 0, \\
 & F = G.
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
 8. \quad & t_{xx} \cdot t_{zz} \left( -\frac{3}{2}F + \frac{3}{2}G \right) = 0, \\
 & F = G.
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
 9. \quad & t_{xy} \cdot t_{zz} (\sqrt{3}F + \sqrt{3}G) = 0, \\
 & F = G.
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Из уравнений (3.9-3.14), учитывая тот факт, что  $F = G$ , получаем:  
 $2H + F - N = 0$ .

Исходя из этого можно сделать вывод, что  $N = 2H + F$ .

В результате преобразований получаем систему уравнений взаимосвязи между параметрами анизотропии для материала с ГПУ решеткой:

$$\begin{cases} L = M, \\ F = G, \\ N = 2H + F \end{cases} \quad (3.16)$$

С учетом системы (3.16) уравнение (3.1) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} H(S_{xx} - S_{yy})^2 + F(S_{yy} - S_{zz})^2 + F(S_{zz} - S_{xx})^2 + \\ + 2(2H + F) \cdot S_{xy}^2 + 2L \cdot S_{yz}^2 + 2L \cdot S_{zx}^2 = 1, \end{aligned} \quad (3.17)$$

или для компонент тензора напряжений:

$$\begin{aligned} H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + \\ + 2(2H + F) \cdot \sigma_{xy}^2 + 2L \cdot \sigma_{yz}^2 + 2L \cdot \sigma_{zx}^2 = 1. \end{aligned} \quad (3.17a)$$

Последнее уравнение отличается от предложенного Р. Хиллом (3.1) тем, что оно содержит меньшее количество констант анизотропии: три вместо шести, при этом отсутствуют константы  $M$ ,  $N$  и  $G$ .

### 3.3. Применение упрощенных уравнений теории Хилла для частных случаев ОМД

Рассмотрим возможность дополнительного упрощения уравнения (3.17a), а также сокращения числа неизвестных параметров для частных случаев процессов обработки металлов давлением.

Во всех вариантах ось  $z$  будет направлена вдоль высоты шестигранной призмы кристаллита с ГПУ решеткой.

#### 3.3.1. Одноосное напряженное состояние растяжения или сжатия

При растяжении или сжатия вдоль оси  $z$  (рис. 3.5, а)  $\sigma_{rr} = \sigma_{\phi\phi} = \sigma_{ij} (i \neq j) = 0$ . После подстановки этих значений в уравнение (3.17a) оно преобразуется к виду:

$$2F \cdot \sigma_{zz}^2 = 1, \quad (3.17б)$$

$$\text{откуда следует, что } \sigma_{zz} = \pm \frac{1}{\sqrt{2F}}.$$

В случае растяжения или сжатия вдоль оси  $\phi$  (рис. 3.5б) справедливы следующие соотношения между напряжениями:  $\sigma_{rr} = \sigma_{zz} = \sigma_{ij} (i \neq j) = 0$ .

Таким образом, уравнение (3.17а) можно преобразовать к виду:

$$(H + F) \cdot \sigma_{\varphi\varphi}^2 = 1, \quad (3.17в)$$

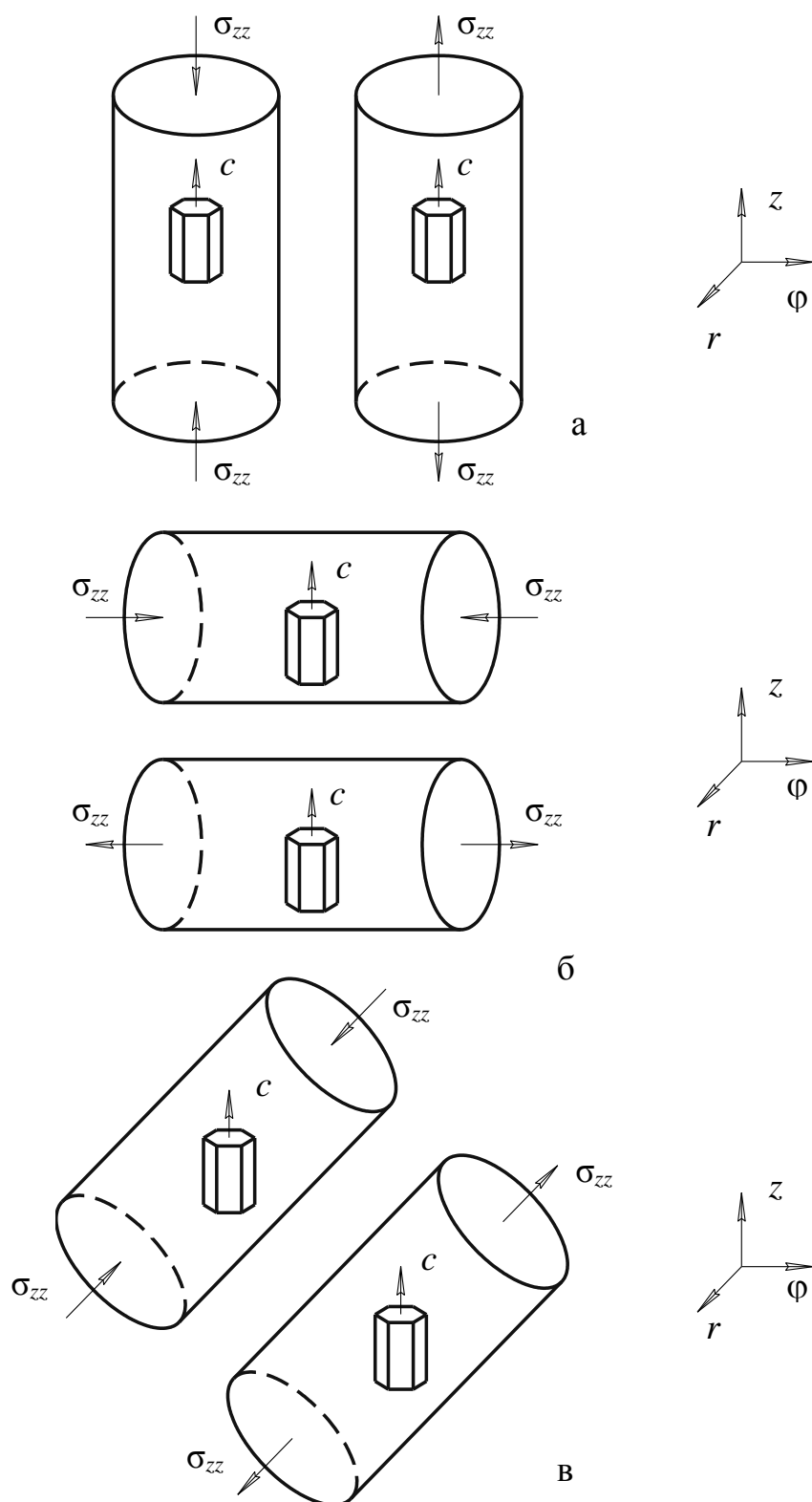


Рис. 3.5. Схемы одноосного растяжения или сжатия: а – вдоль направления оси  $z$ , б – вдоль направления оси  $\varphi$ , в – вдоль направления оси  $r$

откуда следует, что  $\sigma_{\varphi\varphi} = \pm \frac{1}{\sqrt{H+F}}$ .

Аналогичным образом можно показать, что для случая растяжения или сжатия вдоль оси  $r$  (рис. 3.5в) справедливо следующее соотношение:

$$(H+F) \cdot \sigma_{rr}^2 = 1, \quad (3.17\Gamma)$$

а, следовательно,  $\sigma_{rr} = \pm \frac{1}{\sqrt{H+F}}$ .

На основе полученных соотношений можно сделать следующие выводы. Во-первых, для описания процесса осадки заготовки из ГПУ металла в условиях малого трения достаточно одного или двух параметров анизотропии.

Во-вторых, для определения параметров анизотропии  $H$  и  $F$  в образцах с острой текстурой достаточно проведения двух стандартных испытаний на осадку (или растяжение) цилиндрических образцов. Один образец своей образующей должен быть направлен вдоль нормали  $s$  к базовой плоскости кристаллитов ГПУ решетки, второй перпендикулярно этой нормали.

### 3.3.2. Осесимметричное напряженное состояние

Осесимметричное напряженное состояние рассмотрим на примере волочения прутка (цилиндрической заготовки), показанном на рис 3.6.

В случае, если направление волочения совпадает с направлением оси  $z$  (рис. 3.6а), тензор напряжений имеет вид:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} & 0 & \sigma_{rz} \\ 0 & \sigma_{\varphi\varphi} & 0 \\ \sigma_{rz} & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix}.$$

Исходя из этого, уравнение (3.17а) можно преобразовать к виду:

$$H(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + F(\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 2L \cdot \sigma_{rz}^2 = 1. \quad (3.17д)$$

В случае если волочение проводится в направлении, определяемом осью  $\varphi$  (рис. 3.6б), тензор напряжений можно представить в виде:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{zz} & 0 & \sigma_{z\varphi} \\ 0 & \sigma_{rr} & 0 \\ \sigma_{z\varphi} & 0 & \sigma_{\varphi\varphi} \end{pmatrix}.$$

Учитывая это, уравнение (3.17а) можно представить в виде:

$$H(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + F(\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 2L \cdot \sigma_{\varphi z}^2 = 1. \quad (3.17е)$$

Ориентация кристаллитов, показанная на рис. 3.6б, соответствует радиальной текстуре в прутке.

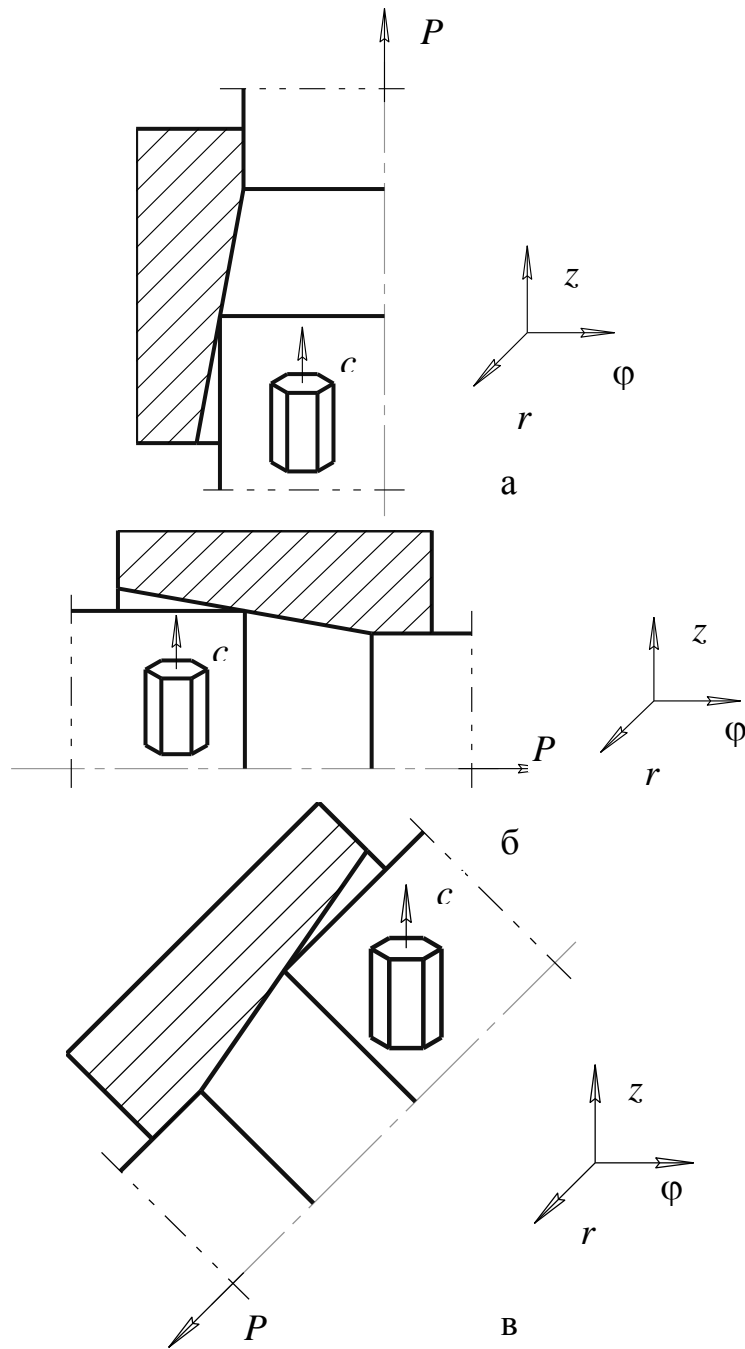


Рис. 3.6. Схема волочения прутка: а – вдоль направления оси  $z$ , б – вдоль направления оси  $\varphi$ , с – вдоль направления оси  $r$

В случае если волочение проводится в направлении, определяемом осью  $r$  (рис. 3.6в), тензор напряжений можно представить в виде:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{\varphi\varphi} & 0 & \sigma_{r\varphi} \\ 0 & \sigma_{zz} & 0 \\ \sigma_{r\varphi} & 0 & \sigma_{rr} \end{pmatrix}.$$

Для этого случая уравнение (3.17а) примет вид:

$$H(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + F(\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 2(2H + F) \cdot \sigma_{r\varphi}^2 = 1. \quad (3.17ж)$$

Ориентация кристаллитов, показанная на рис. 3.8б, соответствует тангенциальной текстуре в прутке.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что для описания напряженного состояния при осесимметричной деформации необходимо знать все три параметра анизотропии –  $H$ ,  $F$  и  $L$ . Знание лишь двух параметров достаточно лишь в случае, когда в прутке имеется тангенциальная текстура.

В реальном техническом процессе текстура, представленная на рис. 3.6а практически не встречается, в то время как текстуры в прутке, представленные на рис. 3.6б и рис. 3.6в, являются возможными. Как показано в работе [1] К. Linga Murty и Indrajit Charit из университета Северной Каролины со ссылкой на работу [4] E. Tenckhoff волочение проволоки из циркониевых сплавов приводит к появлению как радиальной, так и тангенциальной текстуры.

### 3.3.3. Плоское деформированное состояние

Рассмотрим частный случай – плоскую деформацию (в плоскости главных осей анизотропии  $x$ ,  $y$ ). Наиболее близко такому процессу соответствует листовая прокатка (рис. 3.7).

Для плоского деформированного состояния справедливы следующие соотношения между напряжениями:

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0;$$

$$\sigma_{zz} = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = \sigma_{ii}.$$

Последнее условие можно получить, если подставить в уравнение связи напряжений и приращений деформации значение  $d\varepsilon_z=0$  и учесть условие (3.16).

После подстановки этих соотношений в уравнение (3.17а) получим:

$$H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 2(2H + F)\sigma_{xy}^2 = 1. \quad (3.18)$$

Члены уравнения (3.18) можно привести к виду:

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 = F\left(\frac{1}{2}\sigma_{yy} - \frac{1}{2}\sigma_{xx}\right)^2 = \frac{1}{4}F(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2;$$

$$F(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 = F\left(\frac{1}{2}\sigma_{yy} - \frac{1}{2}\sigma_{xx}\right)^2 = \frac{1}{4}F(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2.$$



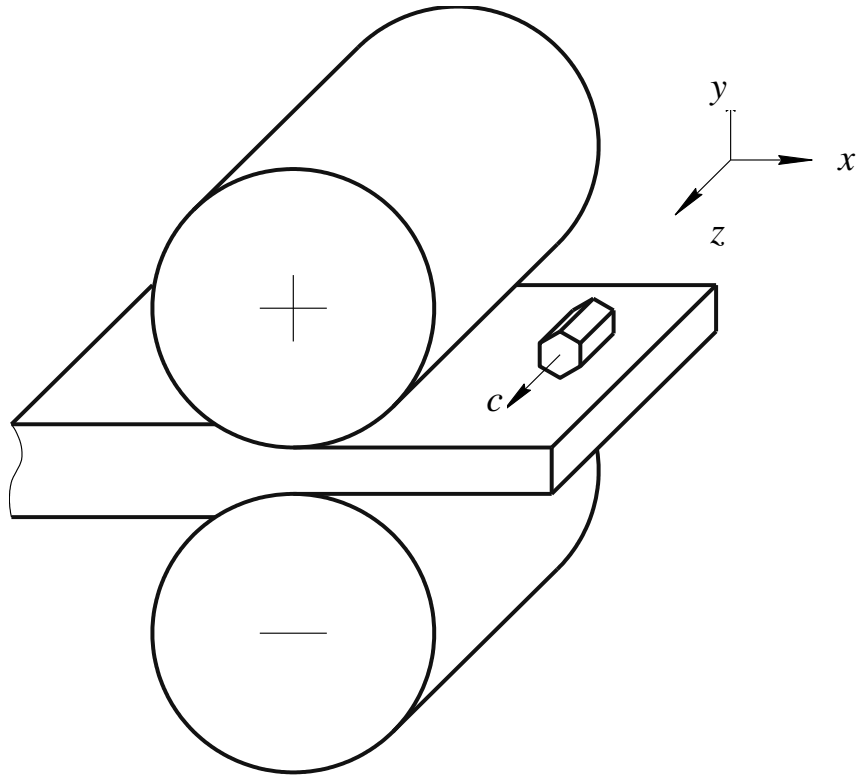


Рис. 3.7. Схема процесса плоской прокатки.

В результате преобразований получаем:

$$\begin{aligned}
 H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \frac{1}{2}F(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2 + 4H \cdot \sigma_{xy}^2 + 2F \cdot \sigma_{xy}^2 &= 1, \\
 H[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2] + \frac{1}{2}F[(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2 + 4\sigma_{xy}^2] &= 1, \\
 [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2] \cdot \left(H + \frac{1}{2}F\right) &= 1, \\
 (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 &= \frac{2}{2H + F}.
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Это уравнение аналогично условию пластичности для плоского деформированного состояния в изотропном металле  $(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 = 4\tau_s^2$ .

Иное расположение кристаллитов в листе не приводит к упрощению уравнения (3.17а), поэтому именно его целесообразно использовать в этих случаях.

### 3.4. Описание взаимосвязи деформированного состояния и параметров Кернса

Кристаллографическая текстура материала, созданная в нем перед процессом деформации, оказывает значительное влияние, как на свойства материала, так и на сам процесс деформации.

Рассмотрим для примера виды текстур, которые могут существовать в трубах. Возьмем три несмешанных вида текстур: радиальная, когда нормали к базисным плоскостям направлены по радиусу трубы, тангенциальная, когда направления нормалей совпадает с тангенциальными направлениями в трубе и продольная, когда нормали направлены параллельно образующей трубы.

Радиальная текстура (рис. 3.8) в титановых трубах характерна для холоднокатаных и холоднотянутых труб [7,19-22]. Этот тип текстуры приводит к наивысшей возможной усталостной прочности металла и наиболее высокой пластичности при изгибе [7, 23].

При деформации трубных заготовок с острой радиальной текстурой течение металла в направлении радиуса трубы затруднено, в то время как в продольном и тангенциальном направлениях течение осуществляется с наименьшим сопротивлением. Соответственно этому сопротивление деформации в направлении оси  $r$  превышает сопротивления деформации в направлениях осей  $\varphi$  и  $z$ .

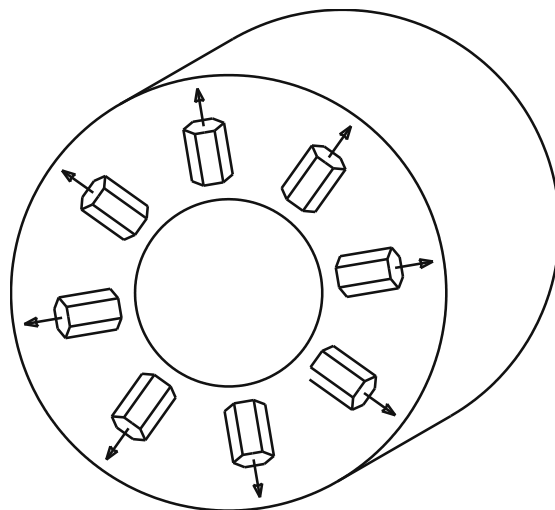


Рис. 3.8. Эскиз расположения кристаллитов ГПУ решетки в трубе при радиальной текстуре

Тангенциальная текстура (рис. 3.9) характерна в основном для прессованных трубных заготовок и для холоднокатаных труб, полученных при специальных режимах прокатки [7]. Этот вид текстуры увеличивает пластичность при раздаче концов трубы.

При деформации трубных заготовок с острой тангенциальной текстурой, течение металла в тангенциальном направлении трубы затруднено, в то время как в продольном и радиальном направлениях течение осуществляется наиболее легко. Соответственно этому сопротивление деформации в направлении оси  $\phi$  превышает сопротивления деформации в направлениях осей  $r$  и  $z$ . Это подтверждается результатами экспериментов по осадке кубических образцов, приведенными в разделе 2.

Сведений об исключительно продольной текстуре (рис. 3.10) в титановых трубах практически не существует, и ни один из стандартных способов деформации труб не приводит к ее образованию. Однако, такой вид текстуры в сочетании с другими можно встретить в горячепрессованных трубных заготовках. Этот вид текстуры препятствует удлинению трубы при обработке.

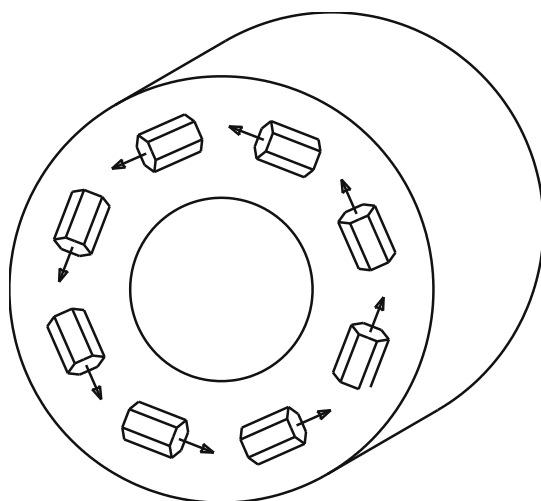


Рис. 3.9. Эскиз расположения кристаллитов ГПУ решетки в трубе при тангенциальной текстуре

При деформации трубных заготовок с острой продольной текстурой течение металла в продольном направлении трубы затруднено, в то время как в тангенциальном и радиальном направлениях течение осуществляется наиболее легко. Соответственно этому сопротивление деформации в направлении оси  $z$  превышает сопротивления деформации в направлениях осей  $r$  и  $\phi$ .

Как упоминалось в разделе 1 удобным простым способом описания текстуры является использование параметров Кернса. Острую радиальную текстуру характеризует значение параметра  $f_r$  близкое к 1, острую тангенциальную –  $f_\phi$  близкие к 1, острую продольную – значения  $f_z$  близкие к 1. Отсутствие текстуры или равномерное распределение кристаллитов по всем направлениям характеризуют значения всех параметров Кернса, равные 0,33.

Параметры Кернса однозначно определяют наиболее вероятное расположение нормалей к базисным плоскостям большей части кристаллитов. Эту совокупность кристаллитов можно представить в виде одной шестиугольной призмы, представленной на рис. 3.11.

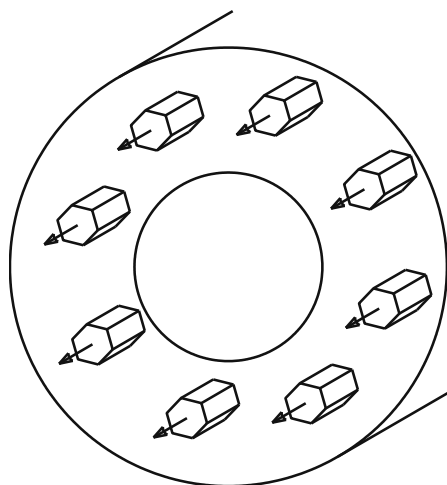


Рис. 3.10. Эскиз расположения кристаллитов ГПУ решетки в трубе при продольной текстуре

Значения  $f_r$ ,  $f_\phi$ ,  $f_z$  равны направляющим косинусам углов наклона направления нормали  $s$  к осям координат соответственно  $r$ ,  $\phi$  и  $z$ .

Таким образом, определив параметры Кернса, можно предсказать поведение металла при деформации и свойства полученного изделия.

Существует также зависимость между деформированным состоянием и получаемой в изделии текстурой. Основным фактором, который отвечает за формирование текстуры в титановых сплавах – это направления и значения пластических деформаций, возникающих в процессе ОМД.

Применительно к деформации циркониевых сплавов сформулировано правило: нормали к базовым плоскостям кристаллитов располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению положительной пластической деформации (удлинения) и параллельны направлению отрицательной деформации (укорочения) [9-13]. Как отмечалось в описании к патентам фирмы Sandvik Special Metals Corporation в [21, 22] его можно распространить и на  $\alpha$  и псевдо- $\alpha$  титановые сплавы.

В ряде процессов ОМД, таких как прессование, холодная прокатка труб и волочение, на элементарный объем в металле действуют не одна, а две деформации сжатия (рис. 3.12).

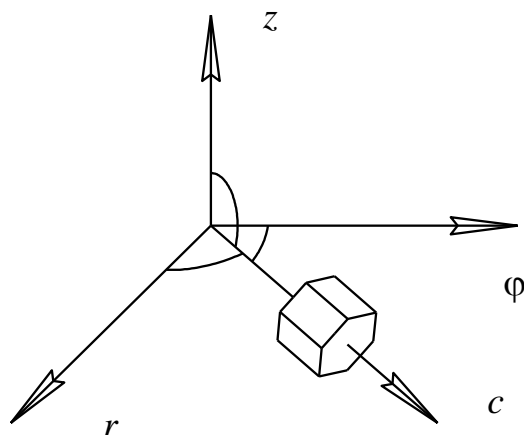


Рис. 3.11. Эскиз расположения кристаллита

В этом случае нормали к базисным плоскостям кристаллитов будут размещаться в плоскости, перпендикулярной направлению деформации растяжения  $\epsilon_{zz}$  и вдоль направлений деформаций сжатия  $\epsilon_{\phi\phi}$  и  $\epsilon_{rr}$ , т.е. в плоскости осей  $r$  и  $\phi$ .

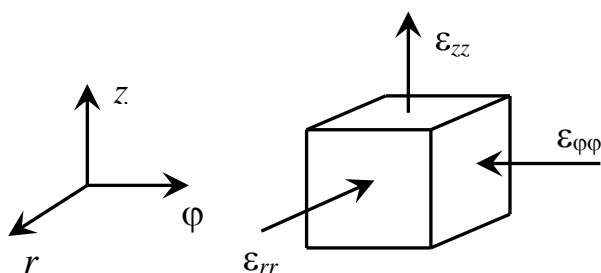


Рис. 3.12. Эскиз элементарного объема

Однако необходимо определить точное направление кристаллитов, или, по крайней мере, наиболее вероятное расположение большей части кристаллитов. Очевидно, что нормали к их базовым плоскостям не будут совпадать с направлением осей  $r$  и  $\phi$ , а находиться где-то между ними (рис. 3.13) и определяться углом  $\alpha$  между нормалью (0002) и  $r$ .

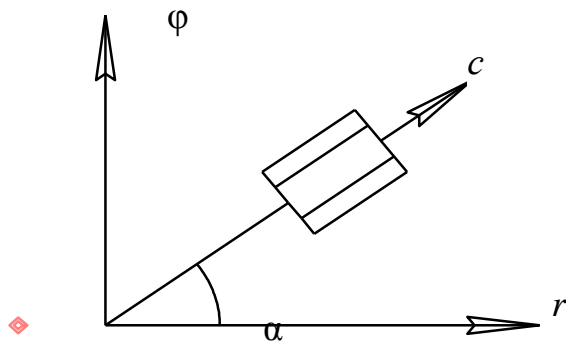


Рис. 3.13. Расположение кристаллита

В случае если  $\varepsilon_{\varphi\varphi} = 0$ , нормаль к базисной плоскости кристаллита (рис. 3.13) будет направлена вдоль оси  $r$ , если  $\varepsilon_{rr} = 0$ , нормаль направлена вдоль оси  $\varphi$ , при  $\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\varphi\varphi}$  угол  $\alpha = 45^\circ$ . Таким граничным условиям удовлетворяет наиболее простая функция связи между углом  $\alpha$  и отношением между  $\varepsilon_{rr}$  и  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\varepsilon_{\varphi\varphi}}{\varepsilon_{rr}}\right).$$

Таким образом, в этом случае параметры Кернса будут равны:

$$f_r = \cos(\alpha), f_\varphi = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right), f_z = 0.$$

Параметры Кернса являются прекрасным инструментом для характеристики типа текстуры, однако об ее выраженности (остроте) они ничего сказать не могут. Характеристикой остроты можно считать максимальное значение  $P_{hkl}$ , взятое из полюсных фигур. И соответственно, чем больше  $P_{hkl}^{max}$ , тем острее текстура.

Острота текстуры также связана с деформированным состоянием в металле. Чем большая деформация растяжения (при учете сохранения ее направления) будет развиваться, тем большее количество кристаллитов будет иметь ориентировку нормалей к их базисным плоскостям в плоскостях, перпендикулярных направлениям этой деформации.

Таким образом, можно сделать вывод, что  $P_{hkl}^{max}$  пропорциональна деформации удлинения  $\varepsilon_{zz}$  (рис. 3.12), в случае, если она является максимальной или в общем  $\varepsilon_{11}$ .

### 3.5. Описание программы для определения параметров Кернса из обратных полюсных фигур

В первой главе была показана целесообразность использования параметров Кернса, как удобного способа характеристики текстуры. Однако рассчитывать эти параметры из обратных полюсных фигур вручную чрезвычайно трудоемко, а компьютерных приложений для автоматизации этого процесса в России не существует. Вследствие этого было принято решение создать программу «KearnsParameters» для оценки анизотропии текстурованных материалов с ГПУ решеткой на основе ОПФ.

Программа написана на языке Free Pascal, в программной оболочке Lazarus 0.9.24 beta. Оболочка Lazarus – это интегрированная среда разработки (IDE) для создания графических и консольных приложений с использованием компилятора Free Pascal, который является аналогом языков Pascal и Object Pascal, распространяемым под лицензией GPL (General Public License), и работающим под Windows, Linux, Mac OS X, FreeBSD [75-76].

Оболочка Lazarus – это приложение, которое позволяет разрабатывать программы для всех вышеперечисленных платформ в Delphi-подобном окружении. Лицензия GPL (General Public License) на программное обеспечение – это вид разрешения, который позволяет не только бесплатно его использовать, но изменять и даже распространять [77], поэтому результаты работы в таких программах можно использовать по своему усмотрению.

Блок схема работы программы «KearnsParameters» представлена на рис. 3.14.

Программа позволяет на основе обратных полюсных фигур получить значения трех параметров Кернса, показывающих расположение кристаллитов в трубной заготовке, а, следовательно, и анизотропные свойства. Помимо этого производится расчет значений параметра отношения деформаций укорочения (contractile strain ratio – CSR), определение которого экспериментальным путем является крайне дорогостоящим и трудоемким процессом.

На основе вычисленных значений параметров Кернса программа позволяет осуществить визуализацию – получить изображение кристаллита (суперпозицию всех кристаллитов, которая показывает их преимущественную ориентацию) в трубе с учетом его ориентации (рис. 3.11). Также выводится значение углов наклона кристаллита по отношению к осям изделия.

В программу введены возможности проверки и корректировки вводимых данных, встроена защита от ввода заведомо неправильных величин, предусмотрена возможность сохранения результатов.

Программа «KearnsParameters» включает в себя окно (рис. 3.15), в котором осуществляется как ввод данных, так и вывод результатов, а также окно визуализации, в котором можно вывести результат в графическом виде (рис. 3.16).

Приведем основные элементы программы.

1. Пункт меню «Файл» включает в себя ряд подменю:

- «Новый» – позволяет осуществить новое вычисление без перезапуска программы. При выборе этого пункта вся несохраненная информация будет потеряна.
- «Сохранить результаты» – сохраняет полученные параметры Кернса, их сумму, погрешность вычислений и параметр CSR в текстовый файл, пример которого показан на рис. 3.17.
- «Визуализация» – осуществляет переход в соответствующее окно.
- «Выход» – осуществляет закрытие приложения с потерей всех введенных данных и несохраненных результатов.

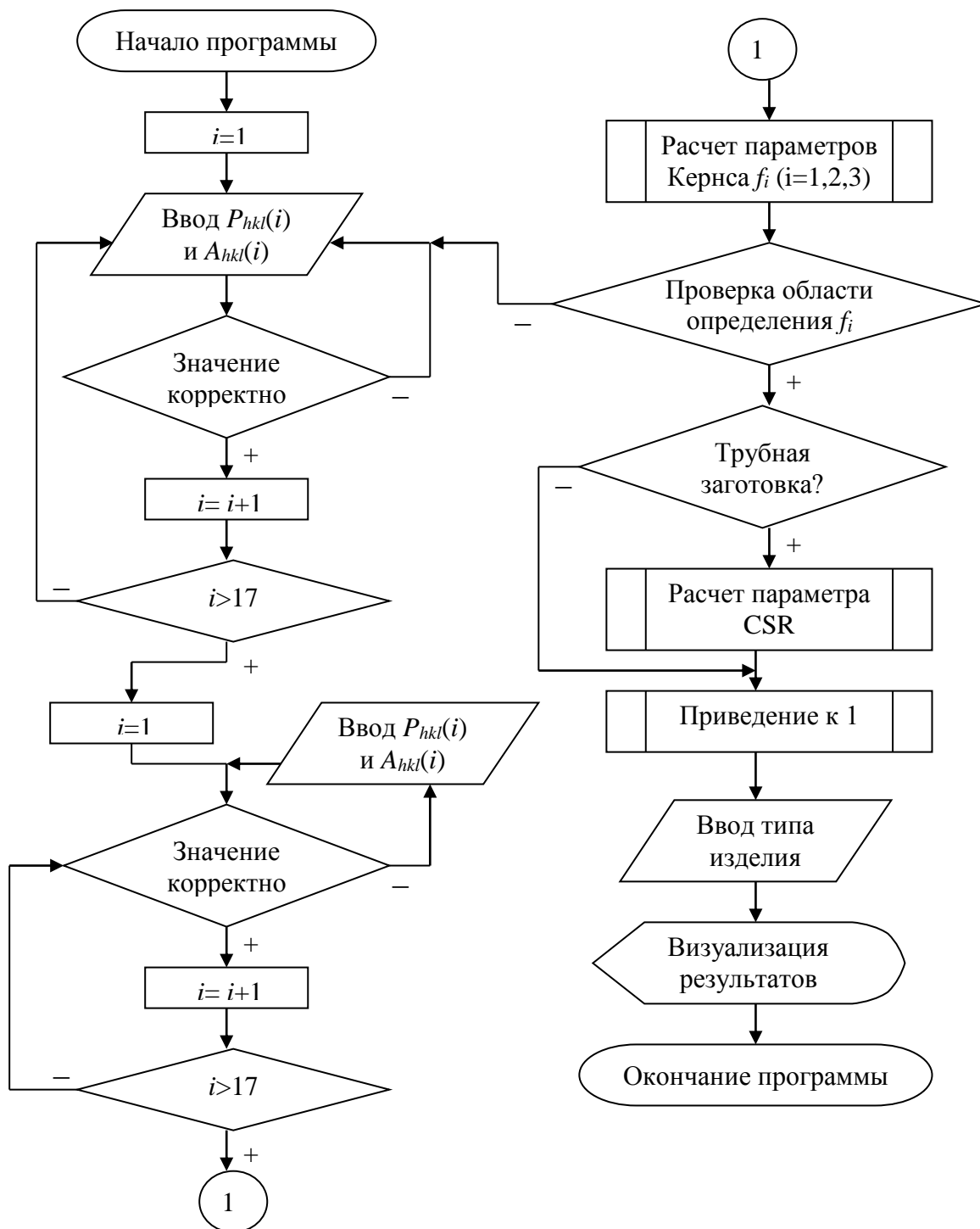


Рис. 3.14. Блок схема программы «KearnsParameters»

2. Пункт меню «Справка» включает в себя следующие подменю:

- «Вывести справку» – выводит справочное руководство в формате html;
- «О программе», которое выводит окно с кратким описанием программы, номером версии и датой создания (рис. 3.18).



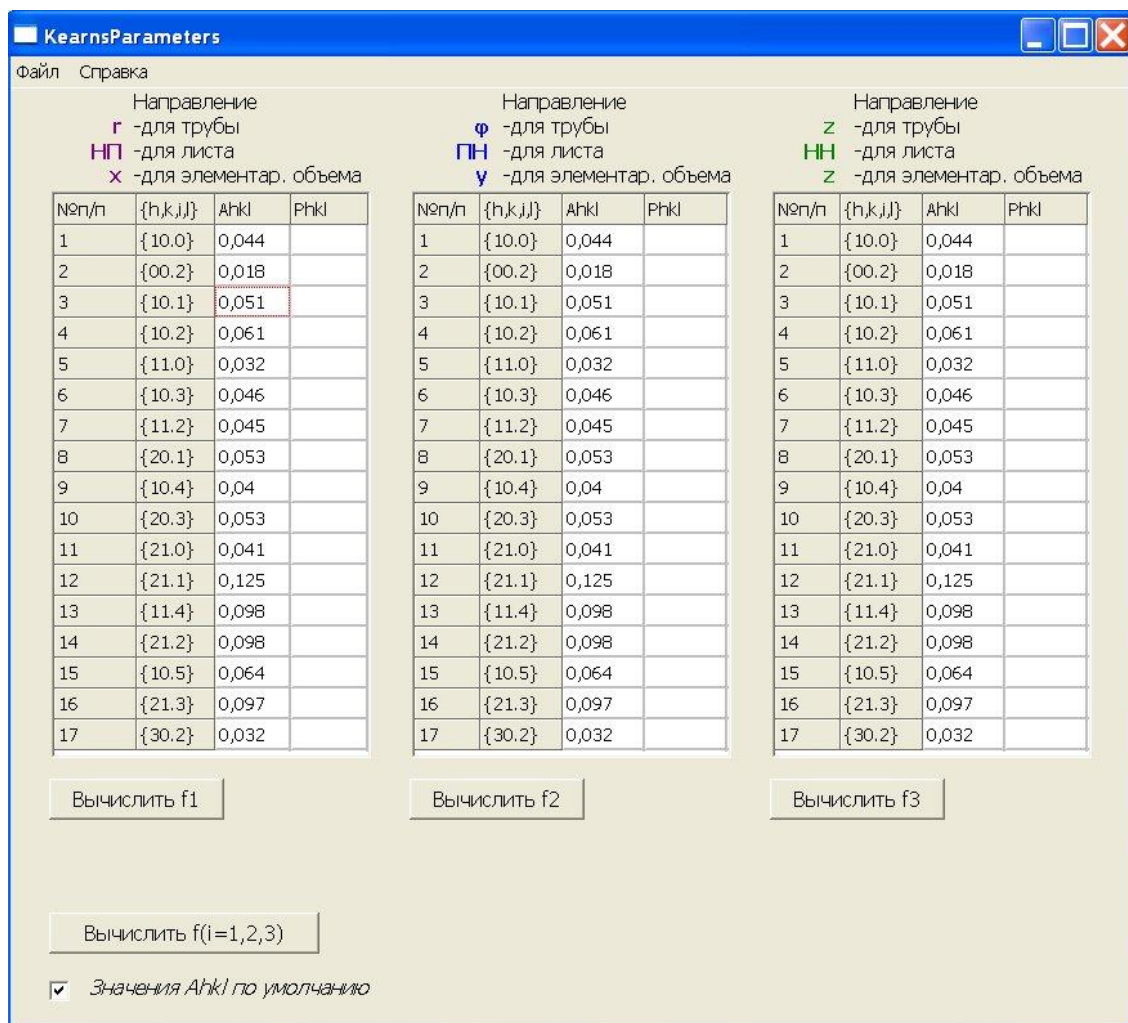


Рис. 3.15. Общий вид программы

3. Обозначения направлений для трубы, листа и элементарного объема. Необходимо очень внимательно сопоставить направления на полюсных фигурах с направлениями в программе, так как, например, для труб ОПФ хорды соответствует радиальному направлению  $r$ , а ОПФ радиуса – тангенциальному направлению  $\phi$ .

4. Таблицы для ввода значений включают в себя по два зафиксированных столбца – номер плоскости в кристаллите и ее обозначение, и столбцы для ввода значений  $A_{hkl}$  и  $P_{hkl}$ .

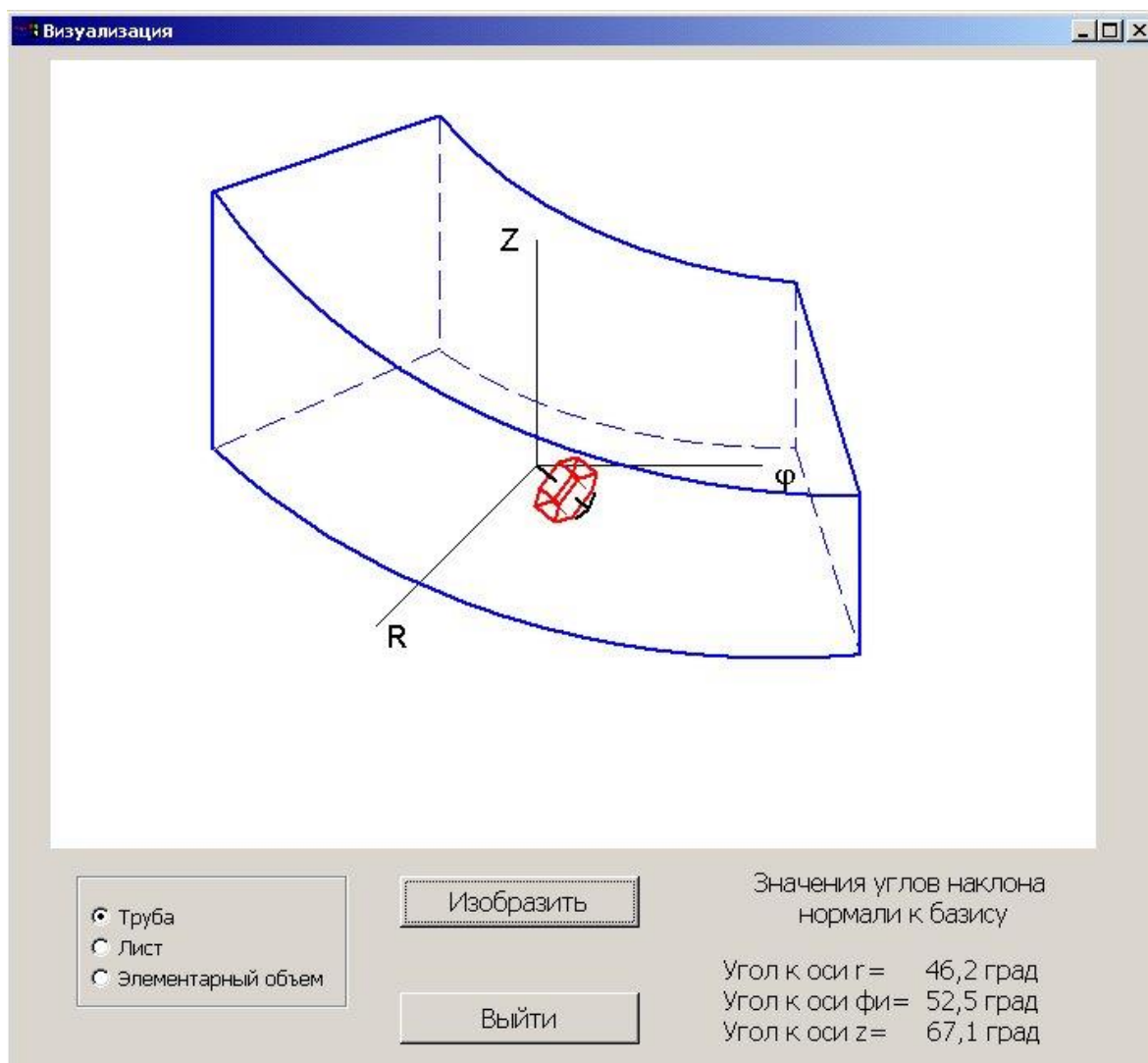


Рис. 3.16. Окно визуализации

5. Переключатель для  $A_{hkl}$  позволяет стереть значения установленные по умолчанию (галочка убрана) или вставить их обратно (галочка включена). Это необходимо в том случае если необходимо ввести свои значения.

Примечание: опция действует на все три таблицы одновременно.

6. Кнопки для вычисления параметров  $f1$ ,  $f2$ ,  $f3$  отвечают за определение соответствующих значений коэффициентов Кернса, кнопка «Вычислить  $f(i=1,2,3)$ » за определение всех трех значений.

Примечание: расчет параметра осуществляется, только если все величины в соответствующей таблице введены, иначе выдается сообщение (рис. 3.19).

7. Кнопка для определения параметра относительного сжатия (CSR) вычисляет значение этой величины в зависимости от полученных  $f_i$  и становится доступной лишь после их вычисления. В случае если значение одного из параметров  $f_i$  превышает единицу, расчет не производится и выводится сообщение об ошибке.

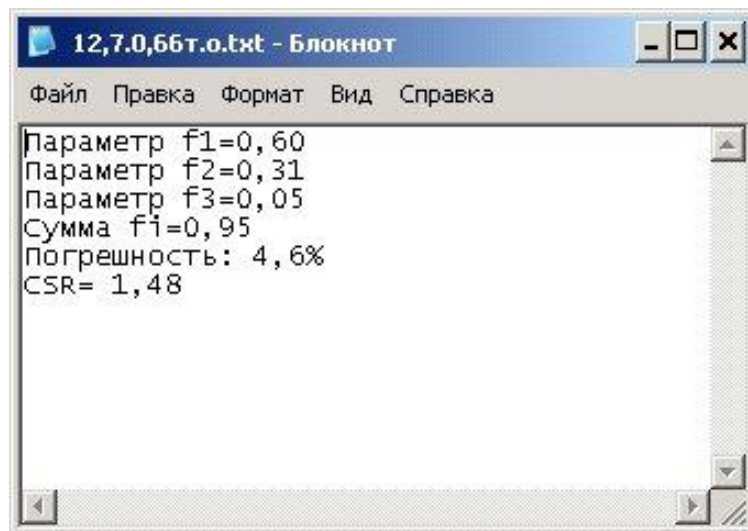


Рис. 3.17. Текстовый файл

8. Кнопка для приведения суммы параметров  $f_i$  к единице осуществляет перерасчет параметров Кернса таким образом, что их сумма равна 1.

Примечание 1: эта операция приводит к определенной погрешности в вычислениях, т.к. невозможно предсказать какая из ОПФ привнесла ошибку, однако в большинстве случаев этой ошибкой можно пренебречь, когда необходимо добиться чтобы сумма параметров была равна единице.

Примечание 2: необходимо произвести операцию приведения к 1 для того, чтобы стала доступна визуализация.

Примечание 3: в случае, если производилось несколько съемок в одном и том же направлении, как например, съемка внешней и внутренней хорды для труб, то вполне вероятно получение разных значений параметра Кернса соответствующего этому направлению, и следовательно и суммы  $f_i$ . В таком случае необходимо провести усреднение именно этого одного параметра, что часто и приводит к значению суммы всех параметров  $f_i$ , близкому к единице.

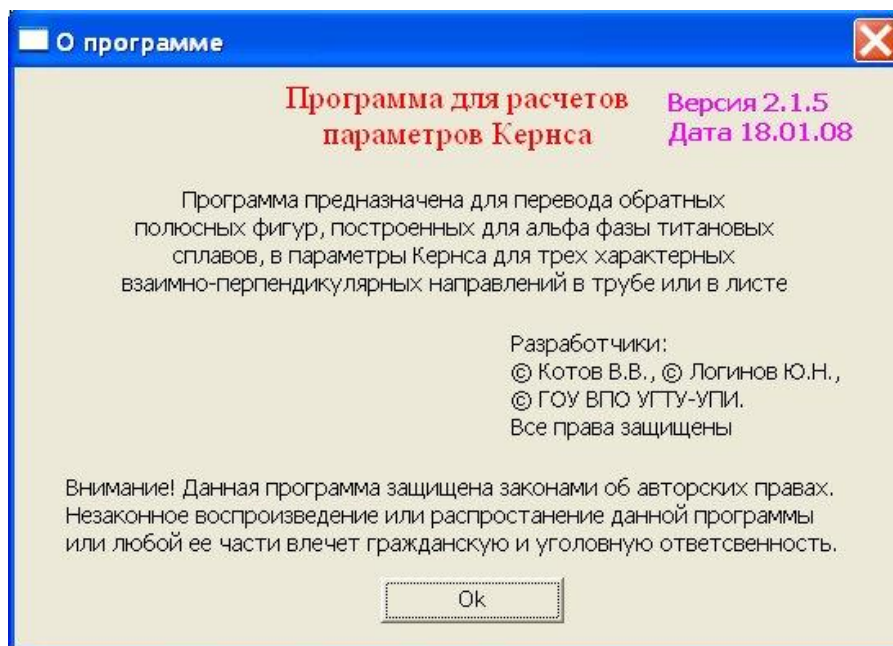


Рис. 3.18. Окно: «О программе»

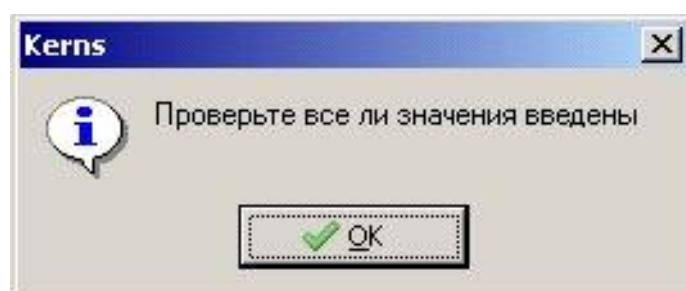


Рис. 3.19. Сообщение об ошибке

9. Кнопка визуализации доступна только при сумме  $f_i=1$  (после нажатия на кнопку «Привести к 1»). Действие – аналогично пункту меню «Визуализация».

10. Дополнительная информация, сопровождающая вычисления. В процессе расчета в поле окна может выводиться следующая информация: значение суммы  $f_i$ , погрешность вычислений, и сообщение о превышении значения этой погрешности установленного значения в 3%. В случае если какие-то величины кажутся программе странными или выходят за рамки допустимых пределов, то они выводятся красным цветом.

Данная программа содержит более 1000 строк.

### 3.6. Способ определения параметров Кернса по измерению микротвердости

В предыдущем разделе была приведена программа для расчета параметров Кернса на основе ОПФ. Съемка ОПФ является достаточно долгим (в среднем на один образец уходит 6 часов) и дорогостоящим

процессом, требующим наличия специального оборудования (рентгеновского дифрактометра) и специальных условий – для защиты персонала. Соответственно данный процесс нельзя проводить «in-situ» – в помещении цеха с относительно небольшими временными затратами.

Поэтому необходимо было создать такой вид испытаний, который позволял бы определять параметры Кернса, но не имел выше приведенных недостатков.

Во второй главе показано, что значения измерений твердости и микротвердости (твердости по микроотпечатку) могут сильно отличаться для одного изделия в зависимости от направления измерений. Построенные для этого изделия ОПФ показали наличие кристаллографической текстуры.

Для проверки наличия взаимосвязи между значениями твердости и кристаллографической текстурой было проведено измерение микротвердости по Виккерсу.

Для проведения эксперимента применили горячепрессованную трубную заготовку из сплава Grade 9 размерами 86,36×11,43 мм, полученную на вертикальном гидравлическом прессе усилием 31,5 МН.

Из трубы вырезали поперечный темплет в виде кольца высотой 20 мм.

Кольцо разрезали на сегменты, из которых изготовили цилиндрические образцы диаметром 7 мм перпендикулярно трем направлениям в трубе – радиальному, тангенциальному и продольному. На торцы цилиндров наносили метки для сохранения сведений об их ориентации относительно оси трубной заготовки. На схеме рис. 3.20 показано размещение осей образцов 1, 2 и 3 относительно темплата трубной заготовки. Образец 1 ориентирован своей осью в радиальном направлении относительно оси трубной заготовки. Образец 2 ориентирован в хордовом направлении, а образец 3 в продольном направлении.

После этого на боковые поверхности цилиндров графически наносили риски, начиная с одного из выбранных направлений (радиального, тангенциального или продольного – в зависимости от расположения вырезанного образца относительно трубы) через каждые 30° (возможно нанесение через 15° для увеличения точности определения распределения твердости).

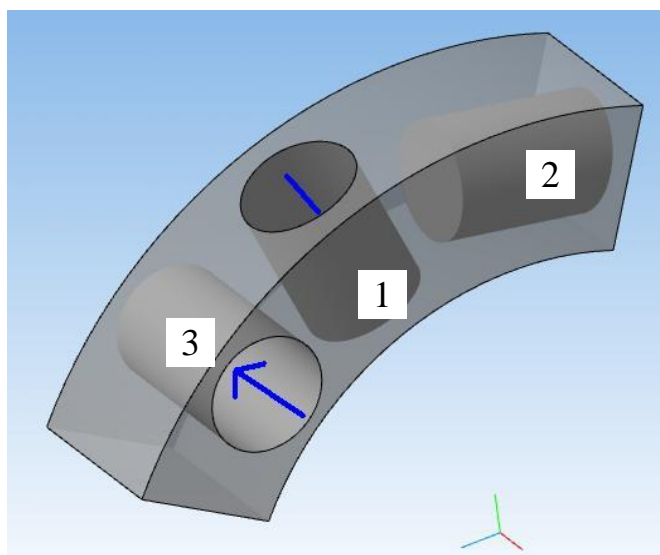


Рис. 3.20. Схема вырезки образцов из стенки трубы: 1,2,3 – номера цилиндров вырезанных соответственно вдоль радиального, тангенциального и продольного направлений в трубе

Размеченный образец укладывали в специальную призму с возможностью поворота (рис. 3.21). Измерения микротвердости проводятся на микротвердомере Duramin-2 фирмы Struers, который позволяет проводить измерения на цилиндрической поверхности.

На рис. 3.22 приведен экран основных установочных параметров для проведения эксперимента.

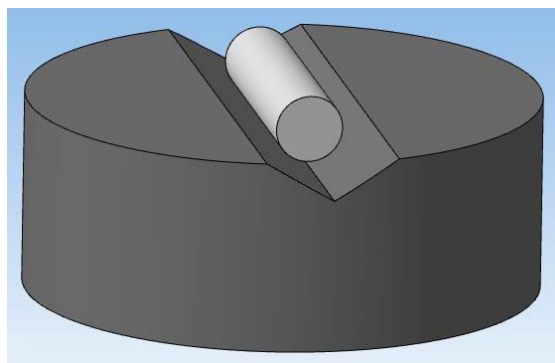


Рис. 3.21. Цилиндрический образец в призме



|                             |                            |                            |                   |                      |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|
| Standard Test               |                            |                            |                   |                      |
|                             | <b>Vickers</b>             | Corr.<br>um<br>0.00        | Mode<br>Ser.      | Save<br>Load         |
| Sample Name<br>ABCDEFGHIJKL |                            | Sample No.<br>0123456789;; |                   | Surf.<br>Flat        |
| #test<br>30                 |                            |                            |                   |                      |
| Lens<br>X40                 | Load<br>9.807 N<br>HV1.000 | Time<br>sec<br>10          | Min.<br>HV<br>0.0 | Max.<br>HV<br>1000.0 |
|                             |                            | Comment<br>ABCDEFGHIJKL    |                   | Test<br>Standby      |

Рис. 3.22. Экран параметров измерений

Значения основных параметров для проведения эксперимента по определению текстуры замером микротвердости приведены в табл. 3.5.

Вдоль каждой из размеченных линий производилось 15 уколов (рис. 3.23), что позволило снизить влияние различных структурных факторов, таких как микронеоднородности. Прилагаемая нагрузка зависит от размера изготовленных цилиндров и от вида сплава, из которого была изготовлена труба, однако общей рекомендацией является диапазон 9,807 – 19,614 Н, что позволяет увеличить точность в определении размеров отпечатка. Более мелкие отпечатки, получаемые при меньших нагрузках более подвержены влиянию структурных неоднородностей, а также их сложнее точно измерить.

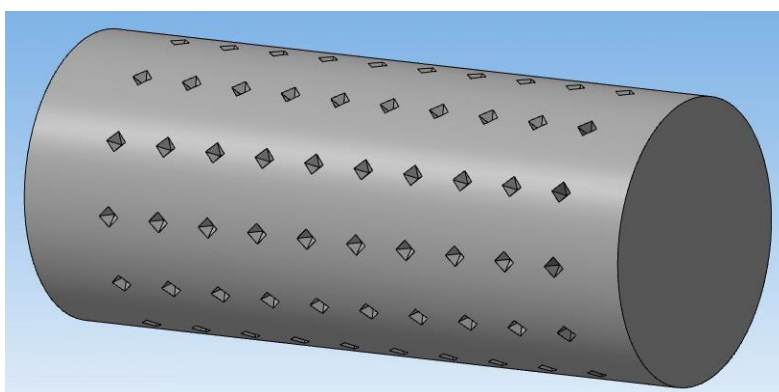


Рис. 3.23. Эскиз образца после проведения эксперимента

Результаты измерений твердости заносили в таблицы. В табл. 3.6 приведены данные, полученные для образца №1, вырезанного вдоль радиального направления в трубной заготовке.

Усредненные значения твердости для трех указанных образцов нанесены на диаграммы рис. 3.24-3.26. Как видно из рис. 3.24, наименьшие значения твердости достигаются вдоль оси трубной заготовки, а

наибольшие – в ортогональном хордовом направлении. Достаточно хорошая симметрия полученной диаграммы свидетельствует о повторяемости результатов измерений при переходе по всем четырем квадрантам.

При ориентации оси образца вдоль хордового (тангенциального) направления (рис. 3.25) направления измерений охватывают в своей совокупности площадки, характеризуемые нормальными, направленными вдоль оси трубной заготовки и в радиальном направлении. Выявлено, что вдоль оси твердость достигается минимальная, а вдоль радиуса – максимальная. Здесь не достигнуты твердости, характеризующие площадки с нормальными, ориентированными в тангенциальном направлении. Значение твердости, измеренной вдоль оси трубы 270 МПа, с точностью до 1 МПа совпало со значением твердости в том же направлении, измеренной в предыдущем опыте, что говорит о приемлемой точности измерений.

Таблица 3.5

Параметры эксперимента

| Параметр                   | Значения                                | Примечание  |
|----------------------------|---|---|
| Нагрузка                   | 9,807 Н;<br>19,614 Н                    | Выбор нагрузки зависит от размеров образца и исходной обработки поверхности   |
| Продолжительность нагрузки | 15 с                                    | Продолжительность нагрузки 15 с регламентирована заводской инструкцией  |
| Вид испытания              | Единичный                               | Этот вид испытаний позволяет производить измерение отпечатка сразу после его получения  |
| Количество испытаний       | 15                                      | Количество испытаний может изменяться в зависимости от необходимой точности и временных затрат  |
| Вид поверхности образца    | Цилиндрическая<br>с диаметром<br>7,0 мм | Прибор позволяет задавать различные типы поверхностей (цилиндр, шар) и производит автоматический перерасчет твердости с учетом введенных размеров |

При ориентации оси образца вдоль осевого направления (рис. 3.26) направления измерений охватывают в своей совокупности площадки, характеризуемые нормальными, ориентированными в радиальном и



тангенциальном направлениях. Выявлено, что вдоль радиуса твердость достигается минимальная, а в хордовом (тангенциальном) направлении – максимальная. Среднее значение твердости, измеренной вдоль радиуса трубной заготовки 288 МПа, а в тангенциальном направлении – 297 МПа, последнее значение совпало с результатами измерений в первой серии опытов. Форма полученной диаграммы близка к окружности, что говорит о близости значений твердости, достигнутых в радиальном и тангенциальном направлении.

Таблица 3.6

Значения твердости по Виккерсу для образца №1

| №<br>исп. | Угол поворота |         |         |         |          |          |       |          |          |          |          |           |
|-----------|---------------|---------|---------|---------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|-----------|
|           | 0             | $\pi/6$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ | $2\pi/3$ | $5\pi/6$ | $\pi$ | $7\pi/6$ | $4\pi/3$ | $3\pi/2$ | $5\pi/3$ | $11\pi/6$ |
| 1         | 271           | 278     | 274     | 299     | 283      | 283      | 274   | 277      | 277      | 295      | 281      | 285       |
| 2         | 273           | 280     | 281     | 294     | 295      | 278      | 271   | 280      | 292      | 296      | 289      | 271       |
| 3         | 269           | 286     | 282     | 300     | 279      | 281      | 273   | 280      | 300      | 308      | 292      | 278       |
| 4         | 271           | 287     | 290     | 297     | 285      | 282      | 275   | 282      | 293      | 300      | 290      | 276       |
| 5         | 261           | 281     | 277     | 288     | 292      | 281      | 275   | 277      | 279      | 298      | 282      | 274       |
| 6         | 278           | 285     | 280     | 290     | 294      | 273      | 271   | 280      | 276      | 301      | 275      | 277       |
| 7         | 266           | 280     | 285     | 295     | 295      | 287      | 270   | 274      | 289      | 294      | 277      | 276       |
| 8         | 271           | 286     | 291     | 303     | 290      | 280      | 271   | 281      | 288      | 287      | 280      | 281       |
| 9         | 273           | 277     | 290     | 290     | 306      | 284      | 264   | 284      | 280      | 296      | 293      | 277       |
| 10        | 273           | 289     | 294     | 292     | 286      | 277      | 277   | 283      | 288      | 288      | 296      | 275       |
| 11        | 268           | 282     | 300     | 289     | 289      | 281      | 275   | 272      | 286      | 294      | 282      | 274       |
| 12        | 275           | 280     | 285     | 298     | 298      | 278      | 269   | 280      | 291      | 302      | 287      | 277       |
| 13        | 272           | 271     | 290     | 299     | 280      | 277      | 270   | 286      | 299      | 301      | 289      | 272       |
| 14        | 273           | 275     | 286     | 302     | 293      | 279      | 279   | 281      | 292      | 291      | 287      | 281       |
| 15        | 273           | 274     | 288     | 295     | 287      | 280      | 270   | 284      | 296      | 298      | 289      | 286       |

Значения твердости по трем направлениям нанесены на гистограмму рис. 3.27, откуда видно, что твердость увеличивается по мере перебора осей в последовательности  $z$ ,  $r$ ,  $\varphi$ .

Также из рис. 3.24-3.26 видно, что между этими направлениями твердость изменяется плавно без больших градиентов, что позволяет сделать вывод о том, что в данном случае для описания текстуры достаточно данных, полученных для трех взаимно перпендикулярных направлений  $z$ ,  $r$ ,  $\varphi$ .

Для проверки результатов эксперимента была применена статистическая обработка. Целями ее являлись:

- проверка нормальности выборок (при одном величине угла) с целью установления правильности проведения измерений,

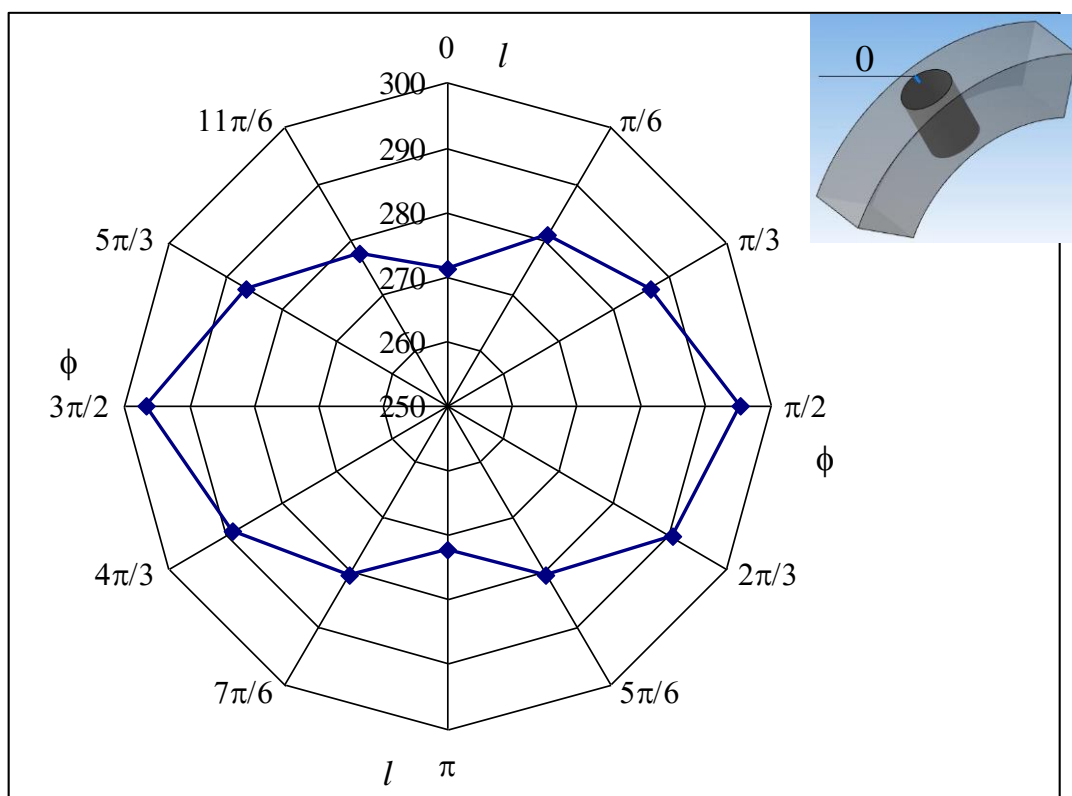


Рис. 3.24. Распределение микротвердости для образца № 1

- проверка факта, что значения измерений для одного и того же направления в трубе являются выборками из одной и той же генеральной совокупности, (т.к. объектом исследования являлся цилиндр, вырезанный из стенки трубной заготовки, то на каждое направление в ней приходится два ряда измерений)
- проверка гипотезы, которая заключена в том, что значения измерений твердости для двух взаимно-перпендикулярных направлений в трубе являются выборками из двух разных генеральных совокупностей, т.е. отличие между средними значениями статистически значимо.

Рассмотрим для примера значения твердости для образца №1, приведенные в табл. 3.6. Как было показано ранее, необходимо в качестве исследуемых выборок взять совокупности значений, соответствующих направлениям в трубе: углы 0 и  $\pi$  – продольному направлению  $l$  (вдоль оси  $z$ ), углы  $3\pi/2$  и  $\pi/2$  – тангенциальному направлению.

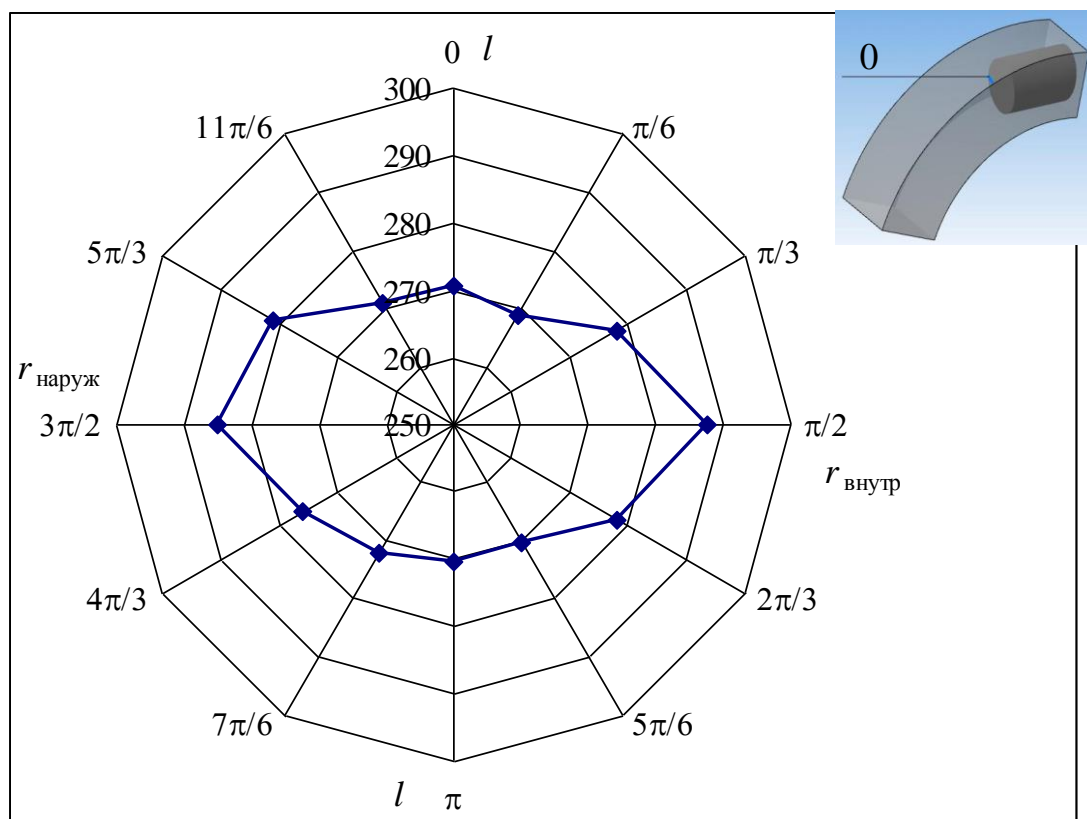


Рис. 3.25. Распределение микротвердости для образца № 2

Вследствие того, что количество значений в каждой из выборок мало, то для определения нормальности их закона распределения необходимо использовать приближенный критерий, которым согласно работе А.М. Михайленко и А.Р. Бондина [78] со ссылкой на работу Б.Е. Хайкина [79] может являться среднее абсолютное отклонение CAO.

Закон распределения с вероятностью  $p=0,95$  (с уровнем значимости  $\alpha=0,05$ ) соответствует нормальному, если выполняется неравенство [78]

$$\frac{CAO}{s} - 0,7979 < \frac{0,4}{\sqrt{N}},$$

где  $s$  – значение среднеквадратичного отклонения,  $N$  – количество опытов.

Значения CAO и среднеквадратичные отклонения выборок для углов  $0, \pi/2, \pi$  и  $3\pi/2$  приведены в табл. 3.7. Количество опытов для всех углов одинаково и составляет 15.

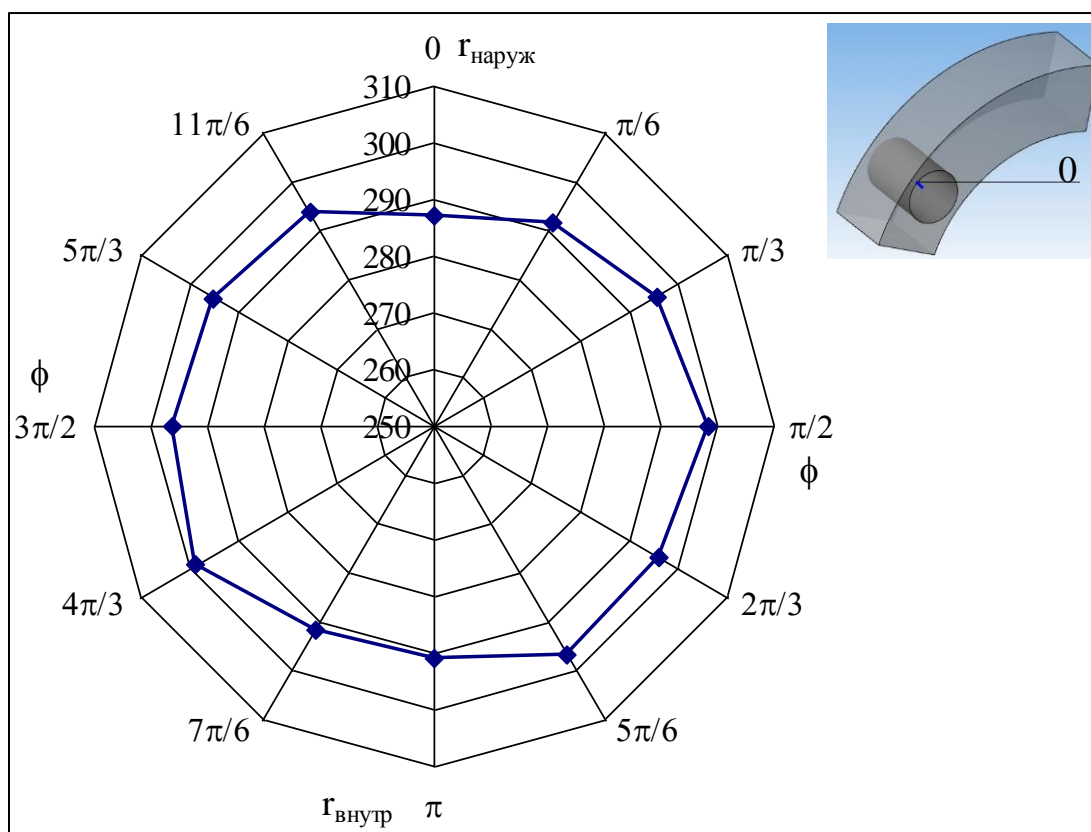


Рис. 3.26. Распределение микротвердости для образца № 3

Таким образом, все рассматриваемые выборки подчиняются закону нормального распределения и для их анализа можно использовать стандартные критерии.

Для проверки принадлежности выборок для углов 0, π одной генеральной совокупности и аналогичной проверки данных для углов π/2, 3π/2 воспользуемся сравнением математических ожиданий двух совокупностей, в случае, если дисперсии генеральных совокупностей не равны. Значения выборочных дисперсий для углов 0, π/2, π и 3π/2 приведены в табл. 3.7.

В качестве нулевой гипотезы примем равенство математических ожиданий при альтернативной гипотезе об их отличии.

Для проверки используется t-критерий Стьюдента [78]. Величина t-статистики рассчитана по выражению [78]:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}}.$$

Значения t-статистики и квантили t-распределения (число степеней свободы ν=14) приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Значения статистических параметров

| Параметр       | Угол поворота |       |         |          | Направление |           |
|----------------|---------------|-------|---------|----------|-------------|-----------|
|                | 0             | $\pi$ | $\pi/2$ | $3\pi/2$ | $l$         | $\varphi$ |
| $\bar{x}$      | 271,1         | 272,3 | 295,4   | 296,6    | 271,7       | 296,0     |
| $s^2$          | 16,0          | 13,8  | 23,3    | 30,5     | 14,7        | 26,3      |
| $s$            | 4,0           | 3,71  | 4,82    | 5,52     |             |           |
| CAO            | 2,79          | 2,95  | 4,03    | 4,24     |             |           |
| $t_{\alpha,v}$ | 2,145         |       | 2,145   |          | 2,045       |           |
| $t$            | -0,80         |       | -0,63   |          | -14,69      |           |

В обоих случаях условие  $|t| \leq t_{\alpha,v}$  выполняется, поэтому принимаем нулевую гипотезу о том, что значения для углов 0,  $\pi$  относятся к одной генеральной совокупности. Аналогичный вывод можно сделать и для углов  $\pi/2$ ,  $3\pi/2$ .

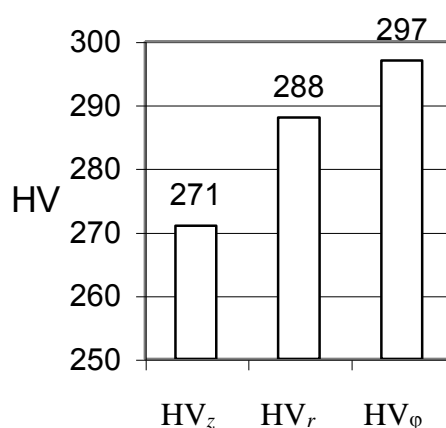


Рис. 3.27. Гистограмма распределения значений твердости

Объединим значения твердости для направления  $l$  в одну выборку на 30 значений. То же самое сделаем и для направления  $\varphi$ .

Эти операции проведены для увеличения объема выборки и облегчения проверки того, что значения измерений твердости для двух взаимно-перпендикулярных направлений в трубе являются выборками из двух разных генеральных совокупностей.

В качестве нулевой гипотезы в этом случае также примем равенство математических ожиданий при альтернативной гипотезе об их отличии.

Значения  $t$ -статистики и квантили  $t$ -распределения (число степеней свободы  $v=29$ ) приведены в табл. 3.7.

Условие  $|t| \leq t_{\alpha,v}$  не выполняется, поэтому принимаем альтернативную гипотезу. Таким образом, отличие между средними значениями для направлений  $l$  и  $\varphi$  статистически значимы.

Аналогичные результаты были получены при статистической проверке измерений на всех трех образцах.

Следующим этапом проведения эксперимента был расчет параметров Кернса для исследуемой трубной заготовки с использованием программы «KearnsParameters». Исходными данными для расчета являлись значения  $P_{hkl}$  и  $A_{hkl}$ , полученные в результате рентгеновской съемки и построении обратных полюсных фигур, представленных на рис. 2.6.

Результаты вычисления параметров Кернса приведены на рис. 3.28. Выявлено, что характер возрастания параметров такой же, как на предыдущей гистограмме: параметры увеличиваются по мере перебора осей в последовательности  $z$ ,  $r$ ,  $\phi$ . Это говорит о том, что между твердостью и параметрами анизотропии имеется прямая зависимость.

Рассмотрим вывод уравнений связи между параметрами Кернса и значениями твердости.

По результатам обработки полюсных фигур рассчитаны три параметра Кернса  $f_z, f_r, f_\phi$ .

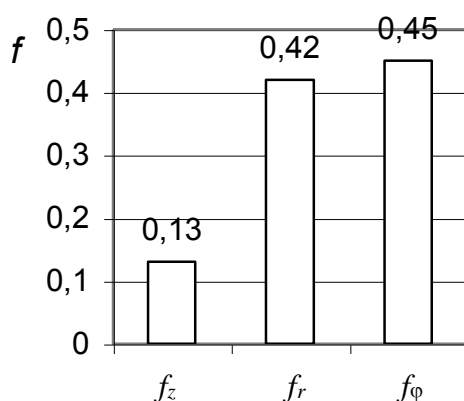


Рис. 3.28. Гистограмма распределения значений параметров Кернса

Измерена твердость в трех ортогональных направлениях: на площадках с нормалью вдоль радиуса  $HV_r$ , вдоль хорды  $HV_\phi$ , вдоль оси  $HV_z$ . Рассчитаны отношения  $K_{HVr} = HV_r/HV_z$ ;  $K_{HV\phi} = HV_\phi/HV_z$ . Введение параметров  $K_{HVr}$  и  $K_{HV\phi}$  преследует две цели: привести показатели к безразмерному виду и сократить количество переменных, между которыми следует установить зависимости с трех до двух наименований. Тем самым сокращается количество необходимых испытаний.

Наиболее простыми видами связи между параметрами твердости и Кернса являются линейные зависимости, которые выглядят следующим образом:

$$f_r = a_r + b_r K_{HVr}; \quad (3.19)$$

$$f_\phi = a_\phi + b_\phi K_{HV\phi}. \quad (3.20)$$

Следует отметить, что для третьего параметра Кернса такие зависимости можно не получать, его можно рассчитать через известное равенство

$$f_z + f_r + f_\phi = 1, \quad (3.21)$$

откуда

$$f_z = 1 - f_r - f_\phi. \quad (3.22)$$

Как видно из приведенной системы уравнений, она содержит четыре неизвестных величины (коэффициента уравнения регрессии)  $a_r, b_r, a_\phi, b_\phi$ .

Один из параметров в каждой из зависимостей может быть исключен применением следующего условия: при наличии изотропной среды по всем трем ортогональным направлениям параметры Кернса равны:  $f_r = f_\phi = f_z = 1/3$ . Для той же среды значения твердости оказываются равны по тем же трем направлениям:  $HV_r = HV_z = HV_\phi$ , откуда  $K_{HVr} = K_{HV\phi} = 1$ . Подставим это условие в предыдущие формулы, получим  $1/3 = a_r + b_r \times 1$ ;  $1/3 = a_\phi + b_\phi \times 1$ ; тогда  $a_r = 1/3 - b_r$ ,  $a_\phi = 1/3 - b_\phi$ .

Отсюда следует, что

$$f_r = 1/3 - b_r + b_r K_{HVr} = 1/3 - b_r (1 - K_{HVr}); \quad (3.23)$$

$$f_\phi = 1/3 - b_\phi + b_\phi K_{HV\phi} = 1/3 - b_\phi (1 - K_{HV\phi}). \quad (3.24)$$

Таким образом, вместо двух коэффициентов уравнения регрессии, например,  $a_r$  и  $b_r$  следует иметь информацию только об одном, что уменьшает количество необходимых опытов. Реально достаточно измерение одной совокупности величин твердости  $HV_r, HV_z, HV_\phi$ .

Определим коэффициенты  $b_r$  и  $b_\phi$  на основе данных, представленных на рис. 3.27 и рис. 3.28.

По результатам измерений твердости получены значения  $K_{HVr} = 288/271 = 1,062$ ;  $K_{HV\phi} = 297/271 = 1,096$ . Превышение значения  $K_{HV\phi}$  над значением  $K_{HVr}$  говорит о том, что тангенциальная текстура превалирует над радиальной. Поскольку оба значения критериев оказались больше единицы, то это означает, что оба эти типа (тангенциальная и радиальная) текстуры превалируют над осевой текстурой, и мы имеем дело с тангенциально-радиальной текстурой.

Эти же выводы следуют из рассмотрения значений твердости: величины  $K_{HVr}$  и  $K_{HV\phi}$  больше единицы, что говорит о превалировании тангенциальной и радиальной текстуры. При этом  $K_{HV\phi}$  оказывается больше  $K_{HVr}$ , что говорит о большей остроте тангенциальной текстуры. Тем самым показана прямая связь между соотношениями твердости и параметрами Кернса.

Найдем параметры  $b_r$  и  $b_\phi$  :

$$b_r = (0,42 - 1/3)/(1,062 - 1) = 1,403$$

$$b_\phi = (0,45 - 1/3)/(1,096 - 1) = 1,219$$

Подставим эти значения в уравнения для нахождения параметров Кернса:

$$f_r = 1/3 - 1,403 (1 - K_{HVr}) = -1,070 + 1,403 K_{HVr}; \quad (3.25)$$

$$f_\phi = 1/3 - 1,219 (1 - K_{HV\phi}) = -0,886 + 1,219 K_{HV\phi}. \quad (3.26)$$

Проверим полученные зависимости на другой горячепрессованной трубной заготовке из титанового сплава Grade 9 наружным диаметром 125 мм и толщиной стенки 15 мм. По приведенной выше методике измерили значения твердости. Усредненные значения твердости в этом случае оказались следующими:  $HV_z = 270$ ;  $HV_\phi = 310$ ;  $HV_r = 283$ ; соответственно  $K_{HVr} = HV_r/HV_z = 283/270 = 1,048$ ;  $K_{HV\phi} = HV_\phi/HV_z = 310/270 = 1,148$ .

Нашли параметры Кернса из предыдущих уравнений при полученных в опытах значениях твердости:

$$f_r = 1/3 - 1,403 (1 - K_{HVr}) = -1,070 + 1,403 \times 1,048 = 0,400;$$

$$f_\phi = 1/3 - 1,219 (1 - K_{HV\phi}) = -0,886 + 1,219 \times 1,148 = 0,513;$$

$$f_z = 1 - f_r - f_\phi = 0,087.$$

Таким образом, параметры анизотропии найдены без проведения рентгеновского анализа. Сравним эти данные с параметрами Кернса, вычисленными при помощи рентгеновского метода и программы «KearnsParameters».

Они равны следующим величинам:  $f_r = 0,40$ ;  $f_\phi = 0,55$ ;  $f_z = 0,05$ . Эти показатели нанесены на гистограмму (рис. 3.29), откуда видно, что характер поведения твердости (рис. 3.30) и параметров анизотропии вновь подтвердился. Текстура для этого случая оказалась гораздо более острой (она ближе к тангенциальной). Однако установленные закономерности зависимостей твердости и показателей текстуры не изменились. Кроме того, в этом примере удалось оценить точность предлагаемого способа: отклонение параметров Кернса, определенных двумя разными методиками составило величину 6 %, что соизмеримо с точностью определения, как твердости, так и рентгеновского анализа.



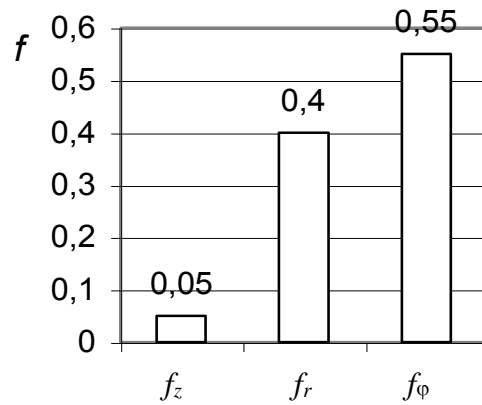


Рис. 3.29. Гистограмма распределения значений параметров Кернса

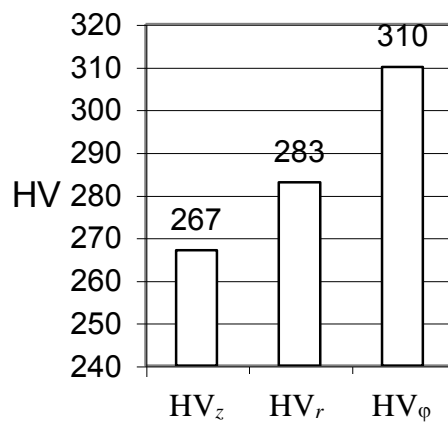


Рис. 3.30. Гистограмма распределения значений твердости

Таким образом, зависимости (3.22, 3.25-3.26) позволяют рассчитать значения параметров Кернса по измерению твердости по микроотпечатку для титанового сплава Grade 9 без применения рентгеновского исследования.

#### 4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТУРЫ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ

Во втором разделе было показано, что горячепрессованная трубная заготовка из титанового сплава характеризуется значительной анизотропией свойств вследствие радиально-тангенциальной кристаллографической текстуры с более сильной тангенциальной компонентой. Такая текстура препятствует перераспределению металла по стенке трубной заготовки при ее прокатке на станах ХПТ. Это приводит к необходимости устранения разнотолщинности трубной заготовки механическим путем перед ее дальнейшей деформацией и соответственно к дополнительным затратам.

Выходом из сложившейся ситуации может служить получение в трубе во время прессования радиальной текстуры, точнее текстуры с более выраженной радиальной компонентой по сравнению с тангенциальной. Поэтому необходимо исследовать, как параметры прессования влияют на текстуру трубной заготовки и найти рычаги управления этим процессом.

Вследствие наличия определенных трудностей при проведении промышленных испытаний из-за высокой стоимости металла и больших временных затрат, принято решение провести компьютерное моделирование процесса прессования. Для осуществления этого выбран пакет DEFORM-3D, предназначенный для решения задач обработки металлов давлением методом конечных элементов.

Выбор именно этого программного комплекса был продиктован следующими соображениями:

- Приложение DEFORM-3D уже в течение нескольких лет активно применяется на ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».
- Из практики работы кузнечно-штамповочного производства этого предприятия данный программный комплекс показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что позволило освоить целый ряд новых поковок.
- Программа DEFORM-3D признана крупнейшими предприятиями двигателе и авиастроения Соединенных Штатов Америки и Европы, такими как Boeing, Airbus, General Motors и другими. Эти предприятия перед согласованием штамповок требуют выполнения расчетов.
- В программном комплексе DEFORM-3D реализована возможность расчета и отображения практически всех характеристик напряженно-деформированного состояния (таких как главные напряжения, главные деформации), необходимых для научных исследований.

#### 4.1. Описание постановки задачи прессования в системе DEFORM-3D

На рис. 4.1 представлена геометрическая постановка задачи прессования: очаг деформации, инструменты и заготовка с характерными размерами. В расчетах принимали значение длины калибрующего пояса  $l_k = 3$  мм для всех вариантов постановки задачи, представленных в табл. 4.1.

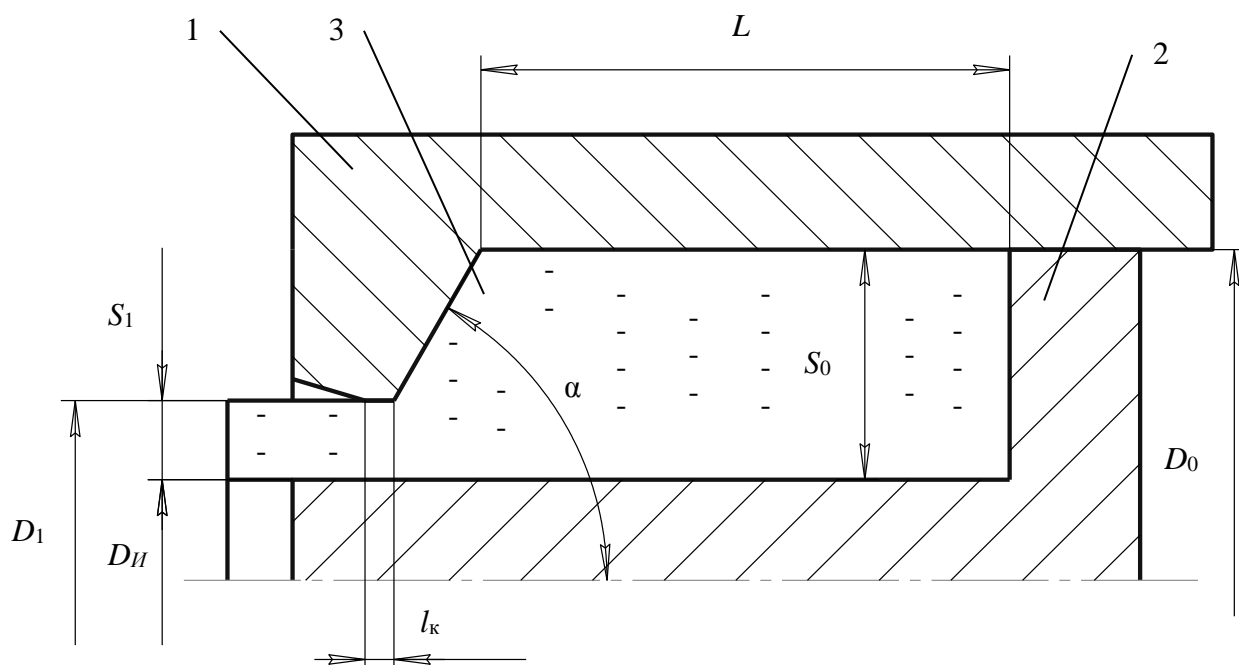


Рис. 4.1. Схема очага деформации при прессовании трубной заготовки: 1 – контейнер, совмещенный с матрицей, 2 – прессштемпель, совмещенный с иглой, 3 – деформируемый металл

Таблица 4.1

Размеры заготовки и инструментов, принятые в расчетах

| №  | $D_0$ , мм | $D_1$ , мм | $D_{И}$ , мм | $S_0$ , мм | $S_1$ , мм | $L$ , мм | $\alpha$ |
|----|------------|------------|--------------|------------|------------|----------|----------|
| 1  | 133        | 88         | 61,3         | 35,35      | 13,35      | 168      | 60°      |
| 2  | 225        | 129        | 92           | 65         | 18,5       | 122      | 60°      |
| 3  | 228        | 145        | 75           | 76,5       | 35         | 190      | 45°      |
| 4  | 191        | 145        | 115          | 38         | 15         | 110      | 45°      |
| 5  | 313        | 145        | 75           | 119        | 35         | 190      | 45°      |
| 6  | 245        | 145        | 115          | 65         | 15         | 110      | 45°      |
| 7  | 228        | 145        | 75           | 76,5       | 35         | 190      | 60°      |
| 8  | 191        | 145        | 115          | 38         | 15         | 110      | 60°      |
| 9  | 313        | 145        | 75           | 119        | 35         | 190      | 60°      |
| 10 | 245        | 145        | 115          | 65         | 15         | 110      | 60°      |

В этой таблице  $D_0$  и  $D_1$  – внешний диаметр заготовки соответственно до и после прессования,  $D_{И}$  – диаметр иглы,  $S_0$  и  $S_1$  – толщина стенки заготовки соответственно до и после прессования,  $L$  –

длина заготовки до подхода к поверхности матрицы,  $\alpha$  – угол наклона матрицы (угол между образующей рабочей поверхности матрицы и осью симметрии).

Первым этапом моделирования является создание исходной геометрии в CAD пакете, в качестве которого применяли Solid Works.

Процесс прессования трубы является осесимметричным, поэтому постановку задачи можно проектировать для части очага деформации – сегмента с центральным углом  $45^\circ$ . Это позволит сократить время расчета в несколько раз, при этом на точности влияния не оказывается. Инструменты в сборе (прессштемпель, соединенный с иглой, контейнер, объединенный с матрицей) и заготовка в объемном виде показаны на рис. 4.2.

Поверхность трехмерного тела в формате stl пакетом Solid Works заменяется большой совокупностью треугольников, которые с наперед заданной точностью описывают ее геометрию [80]. Подбором вариантов установлены параметры перевода в формат stl:

- допуск линейных размеров 0,055 мм,
- допуск угловых размеров  $3,166^\circ$ .

Чрезмерное повышение точности по допуску и по углу приводит к значительному увеличению количества треугольников, что в дальнейшем затрудняет построение конечно-элементной сетки и часто приводит к невозможности расчета. Уменьшение точности приводит к погрешности в описании трехмерных тел, что также оказывает негативное влияние на точность расчета.

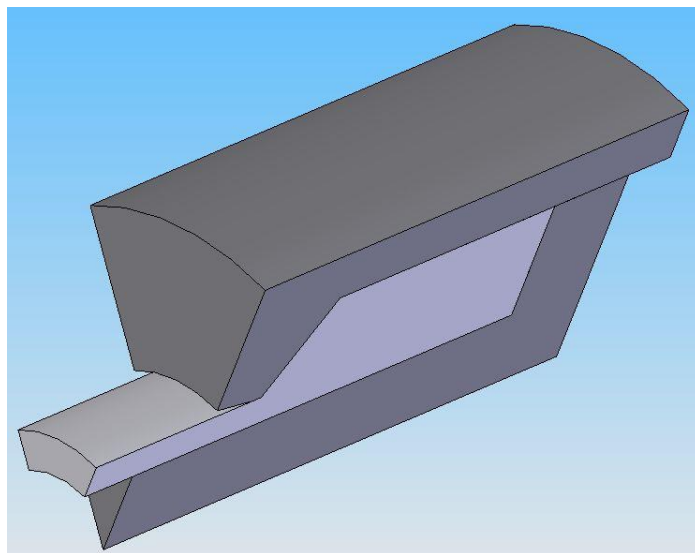


Рис. 4.2. Трехмерная модель инструментов и заготовки при прессовании трубы

При подготовке исходных данных использовали процедуру «препроцессинг» для постановки произвольного процесса деформации.

Для той же цели возможно использование специального мастера «Forming» (деформирование), который позволяет задать большинство процессов ОМД за несколько шагов, устанавливая на каждом ряд параметров. Однако этот вариант имеет ряд ограничений по точной настройке процесса, поэтому воспользовались стандартной, пусть и более трудоемкой и сложной постановкой через процедуру «препроцессинг».

При постановке задачи в качестве объектов моделирования назначили деформацию и тепловые процессы, а в качестве типа расчета – «incremental» (метод приращений).

После проверки геометрии заготовки производили проверку расположения нормалей к поверхности тела наружу (рис. 4.3). Аналогичную проверку проводили для инструментов

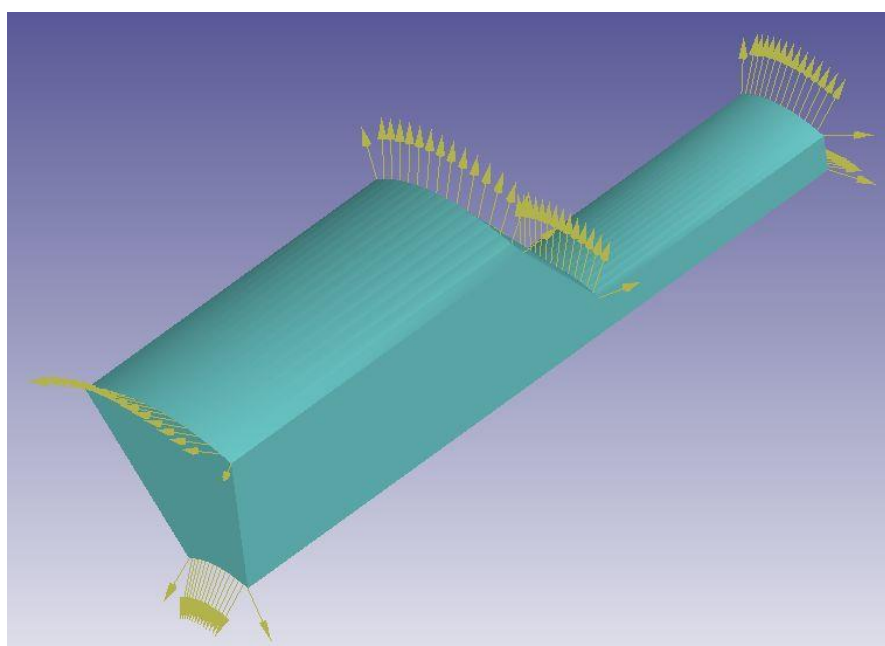


Рис. 4.3. Установленное расположение нормалей к поверхности заготовки

Нанесение на заготовку сетки конечных элементов осуществляли в процедуре построения относительной сетки при количестве элементов равном 30000. При постройке относительной сетки определяется количество твердотельных элементов, которое остается постоянным в процессе всего расчета [52].

Так как передний конец заготовки покинул очаг деформации, а задний конец находится далеко от него, то в этих областях задали увеличенный размер элемента – выделили плоскости переднего и заднего конца заготовки при помощи инструмента «Pick Nodes» и в поле «Relative Element Size» ввели значение 3. В области контакта заготовки с матрицей необходим меньший размер элемента, поэтому ввели значение относительного размера элемента равный 1.

После генерации получили разбитую на конечные элементы заготовку, представленную на рис. 4.4. Из рис. 4.4 видно, что наиболее мелкая сетка получилась как раз в области очага деформации, что на первых шагах повысит точность и увеличит скорость расчета.

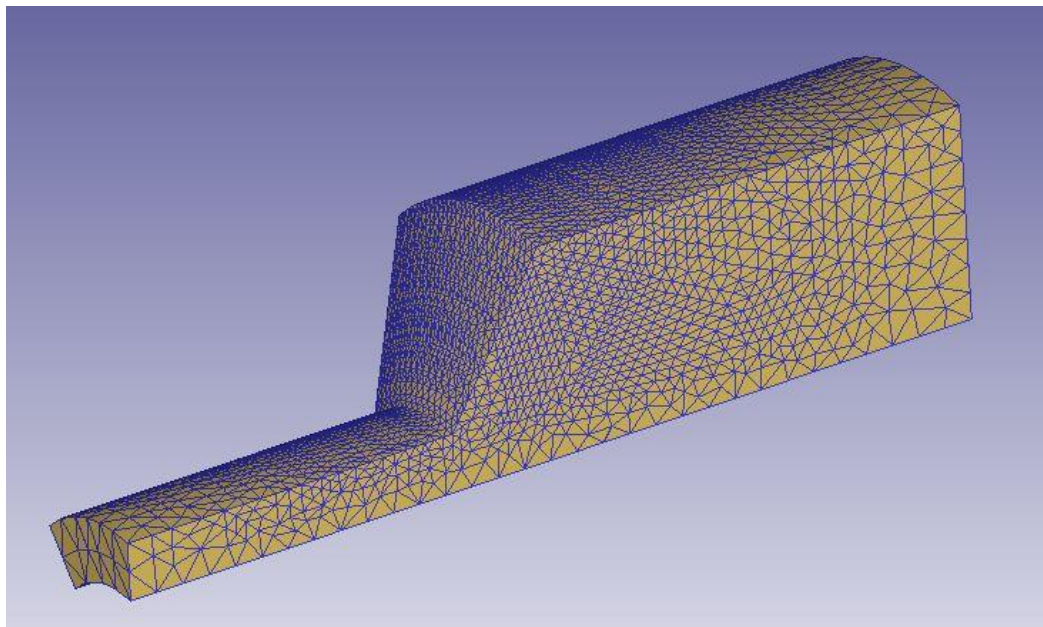


Рис. 4.4. Модель заготовки после генерации сетки

Необходимо отметить тот факт, что хорошо подготовленная начальная сетка еще не гарантирует возможность проведения расчета, потому что после ряда шагов конечные элементы сильно искажают свою форму и тетраэдры могут даже вырождаться в плоскости.

Для инструментов создание конечно-элементной сетки бывает необходимо только в двух случаях – при расчете их на прочность и при решении тепловой задачи. Во втором случае достаточно сгенерировать сетку по умолчанию – относительную с количеством элементов не более 8000.

Сборка инструментов и заготовки после создания сетки приведена на рис. 4.5. Видно, что сетка в заготовке гораздо более мелкая.

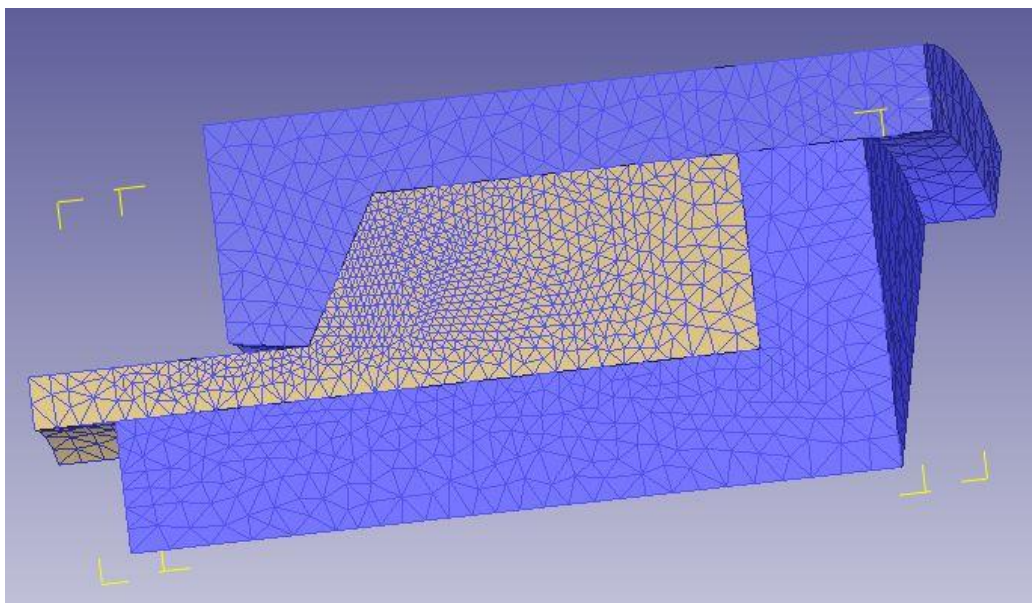


Рис. 4.5. Вид инструментов и заготовки после создания сетки

В базе данных программы DEFORM-3D сплав Grade 9 (Ti-3Al-2,5V) или в Российском эквиваленте ОТ-4-1В не выявлен. Сплав ОТ4-1В был создан относительно недавно, поэтому отыскать его кривые упрочнения не представляется возможным. В качестве наиболее близкого аналога использовали  $\alpha$ -сплав ОТ4 (Ti-3Al-2,5Mn) [81].

С помощью мастера построения кривых упрочнения (рис 4.6) построены зависимости сопротивления деформации от степени и скорости деформации и от температуры. При выборе типа интерполяции и экстраполяции (логарифмический или линейный) использовали логарифмический тип, так как для процесса прессования, степени деформации намного превышают значения, получаемые при стандартных испытаниях.

Оставшиеся свойства (коэффициент Пуассона, модуль Юнга, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) для сплава Ti-3Al-2,5V взяты из международной библиотеки материалов [www.matweb.com](http://www.matweb.com).

В качестве материала инструмента используется инструментальная сталь 5ХНМ. Аналогов в базе данных DEFORM-3D найти не удалось, поэтому аналогично был создан элемент базы данных с названием «5ХНМ» и заданием всех его свойств.



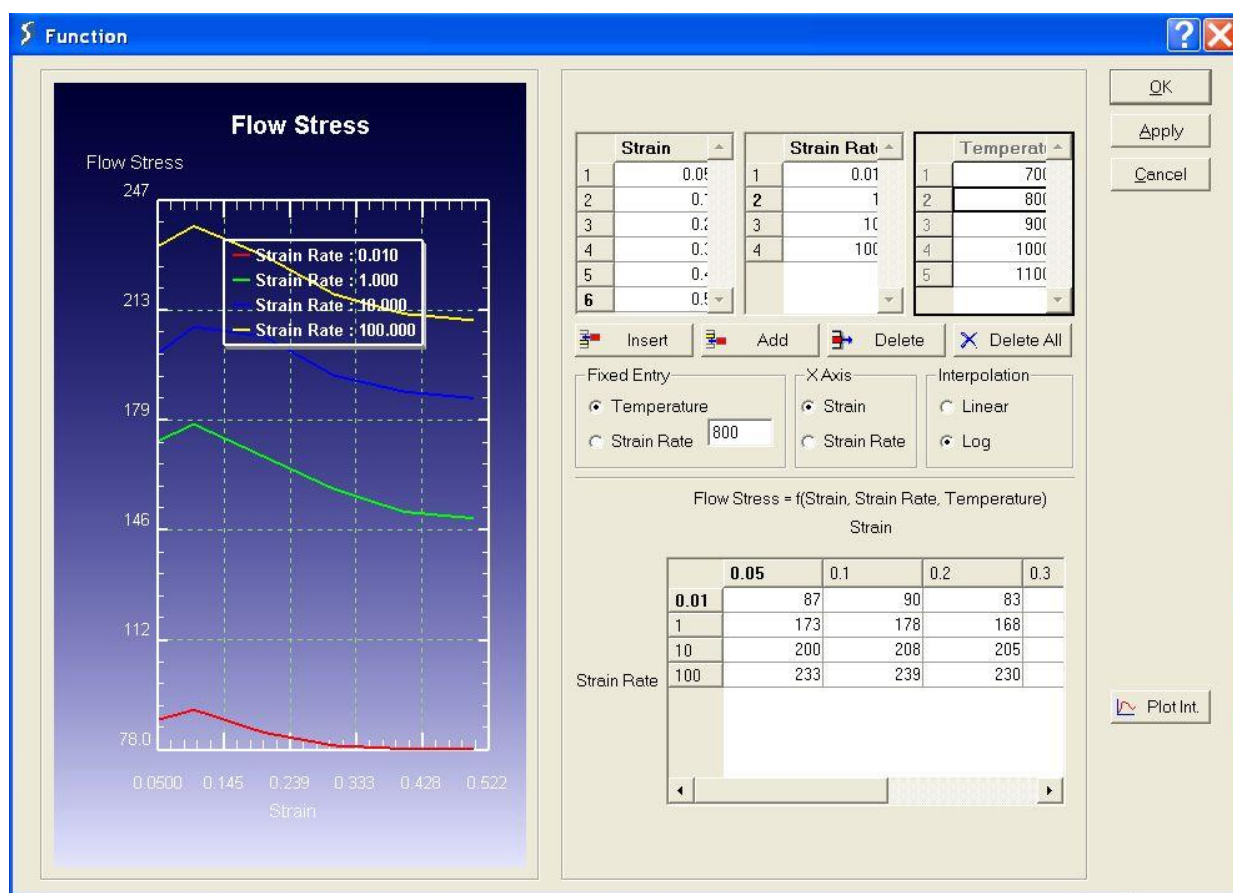


Рис. 4.6. Построение кривых упрочнения

В качестве начальных условий задавали температуру заготовки – 850°C, инструментов – 200°C (взята из заводской практики) и окружающей среды – 20°C.

Граничные условия в скоростях задавали в следующем виде. Исходя из заводского опыта эксплуатации прессы 31,5 МН (скорость движения траверсы практически постоянна во время всего процесса деформации), выбирали вариант указания постоянной скорости инструмента (пуансона, совмещенного с иглой) 40 мм/с. Величину перемещения пуансона назначали равной  $(L-30)$  мм.

Тепловые граничные условия задавали путем указания поверхностей заготовки, на которых будет идти теплопередача, т.е. находящихся в контакте с инструментом или окружающей средой (рис. 4.7). Значение коэффициента теплопередачи между заготовкой и инструментами принимали равным  $3,25 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{мм} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$  на основе данных, приведенных в диссертационной работе А.С. Шибанова и ряда публикаций [82-84].



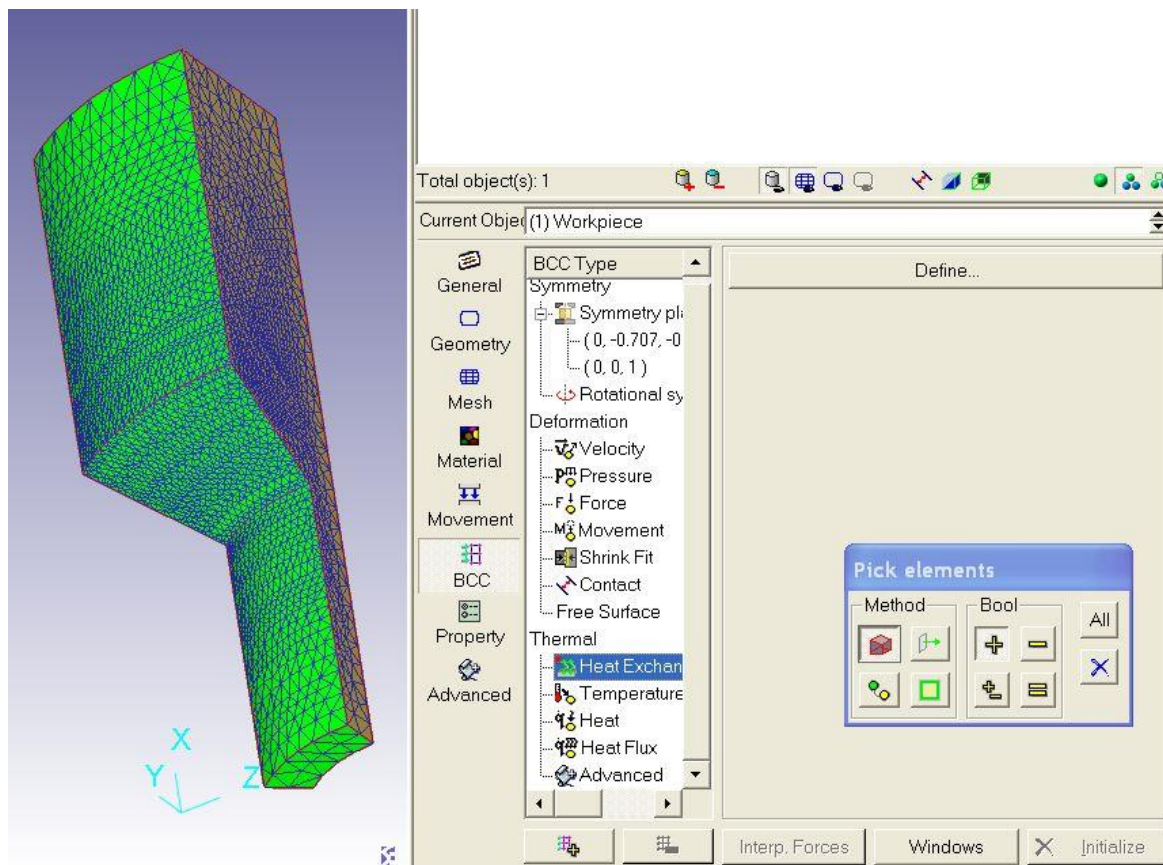


Рис. 4.7. Задание граничных условий теплообмена

В качестве граничного условия задавали закон трения и коэффициент трения. Согласно рекомендациям той же диссертационной работы А.С. Шибанова, а также работам А.Н. Леванова [85, 86] использовали закон трения по Зибелю и коэффициент трения 0,26.

При постановке задачи были учтены граничные условия симметрии (рис. 4.8). Они заключаются в том, что на плоскостях симметрии скорости перемещения, перпендикулярные этим плоскостям, равны 0.

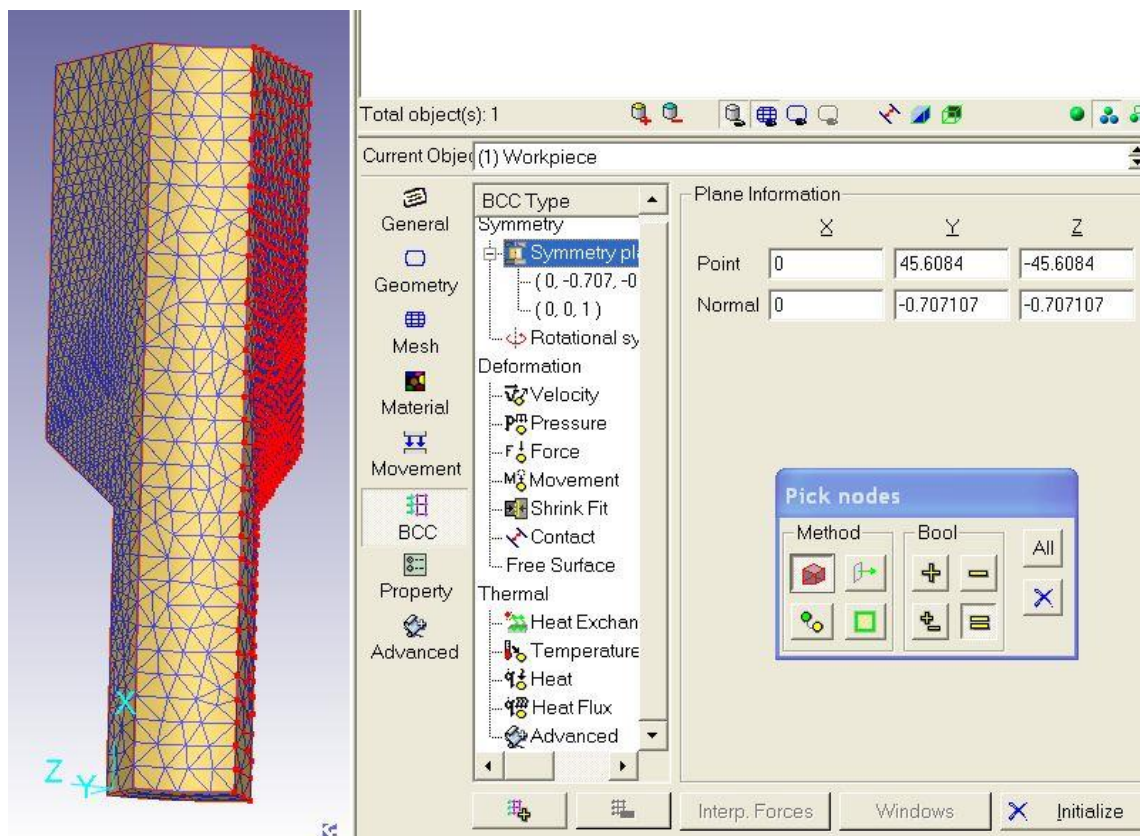


Рис. 4.8. Инициализация граничных условий симметрии

#### 4.2. Моделирование процессов прессования трубных заготовок с известной текстурой

На первом этапе исследования проведено моделирование реального технологического процесса прессования двух трубных заготовок. Параметры процесса и размеры заготовок приведены в табл. 4.1.

Задачу для каждой из трубных заготовок ставили в двух вариантах: с учетом процесса теплообмена между заготовкой, инструментом и окружающей средой и в изотермической постановке.

После проведения моделирования были построены эпюры распределения главных деформаций. Выбор их в качестве анализируемых параметров продиктован наличием связи между деформациями и формируемой в металле текстурой, что показано в разделе 3.

На рис. 4.9-4.12 показаны эпюры распределения главных деформаций в виде линий равного уровня для всех четырех постановок задачи прессования. Каждая из линий обозначена одной из букв латинского алфавита.

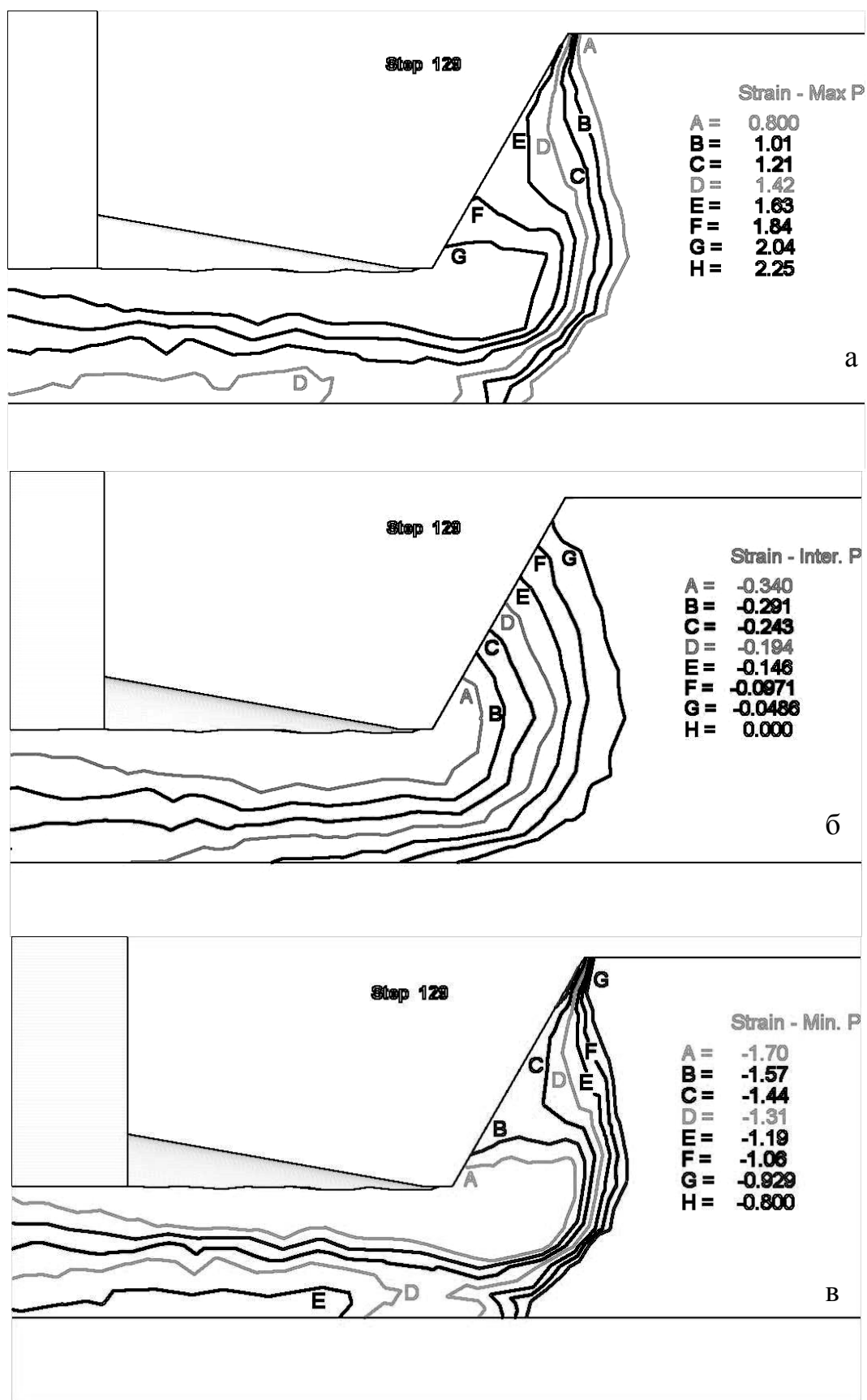


Рис. 4.9. Эпюры распределения главных деформаций при неизотермической постановке задачи прессования трубной заготовки №1:

а -  $\epsilon_{11}$ , б -  $\epsilon_{22}$ , в -  $\epsilon_{33}$

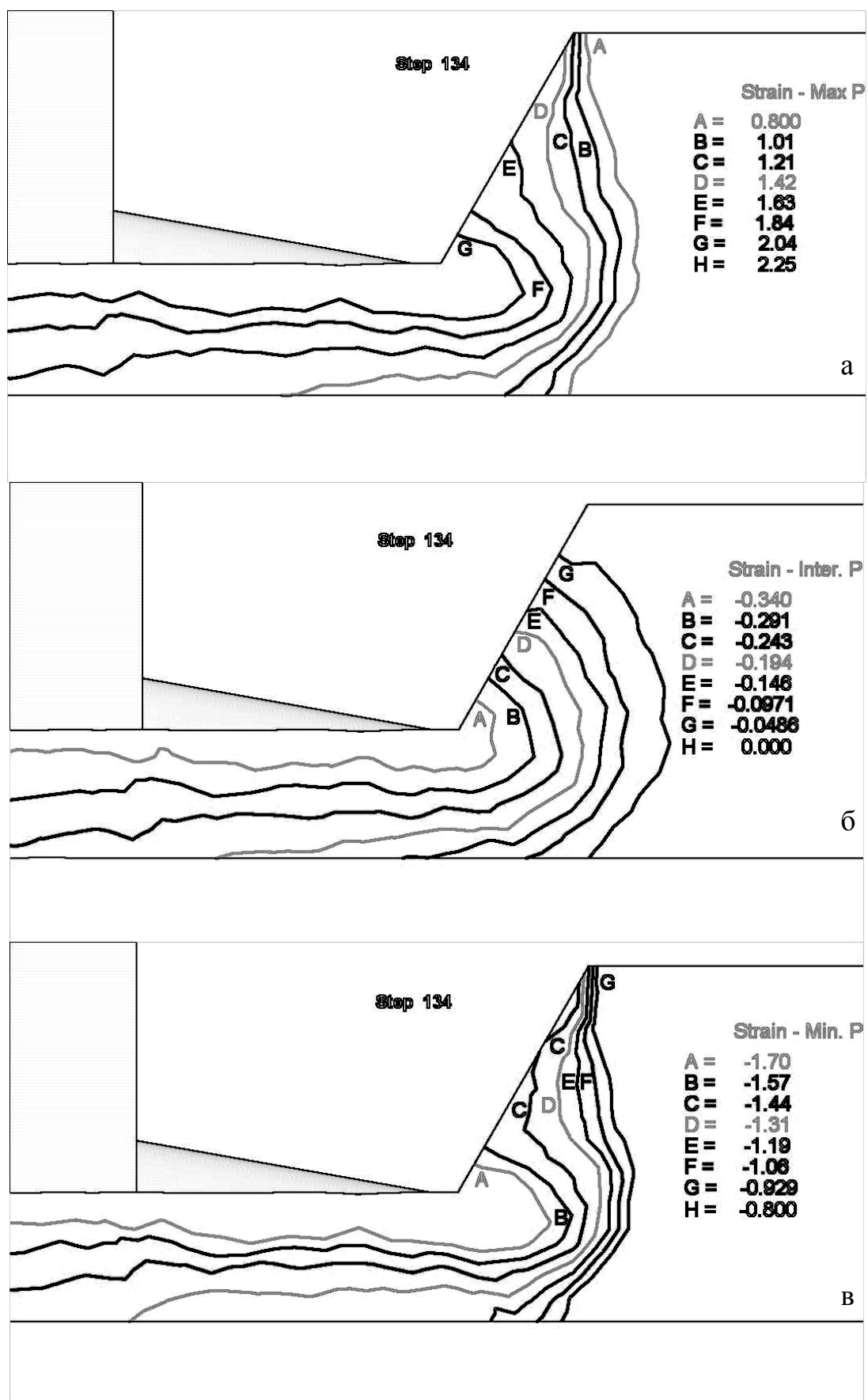


Рис. 4.10. Эпюры распределения главных деформаций при изотермической постановке задачи прессования трубной заготовки №1: а -  $\varepsilon_{11}$ , б -  $\varepsilon_{22}$ , в -  $\varepsilon_{33}$

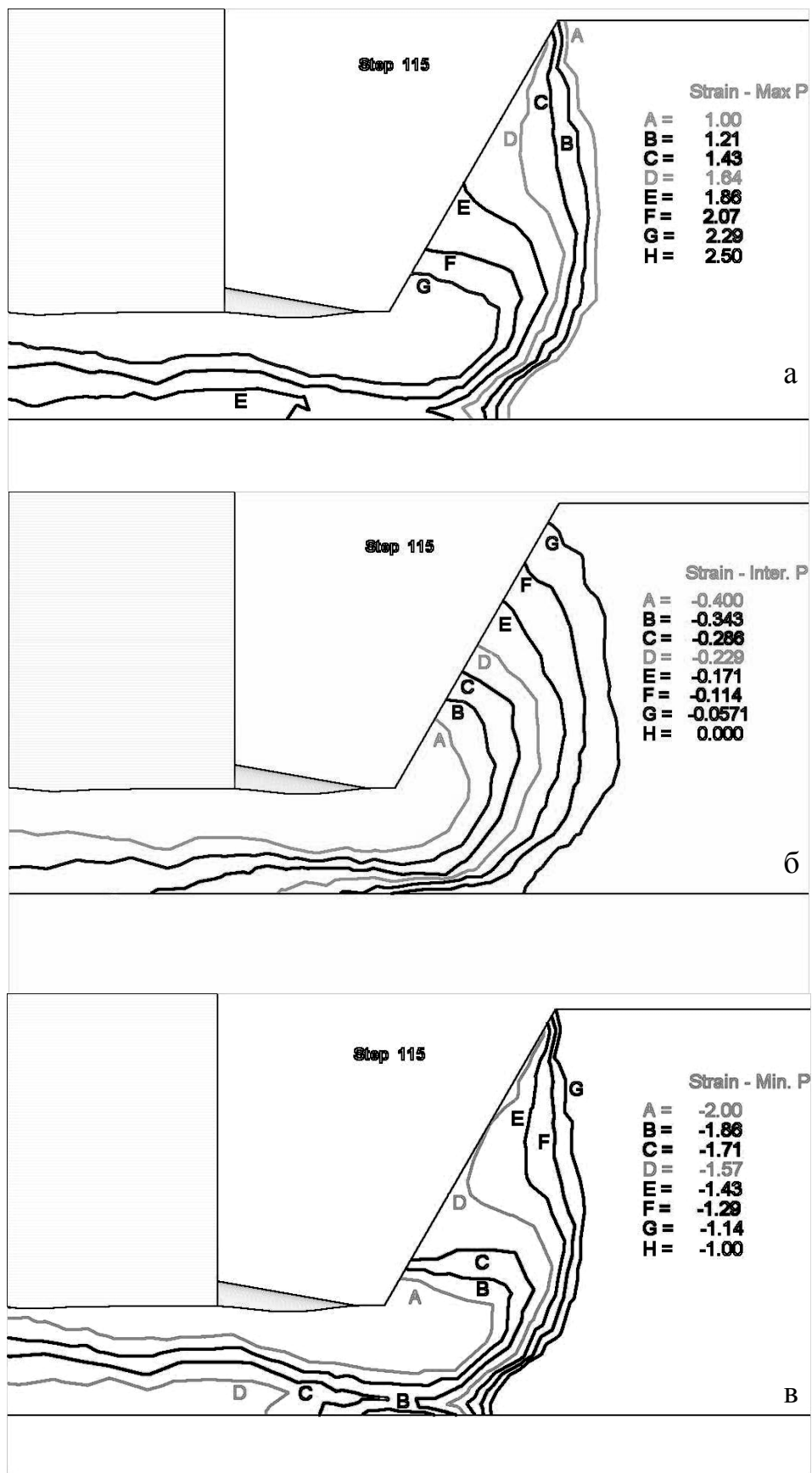


Рис. 4.11. Эпюры распределения главных деформаций при неизотермической постановке задачи прессования трубной заготовки №2:  
а -  $\epsilon_{11}$ , б -  $\epsilon_{22}$ , в -  $\epsilon_{33}$

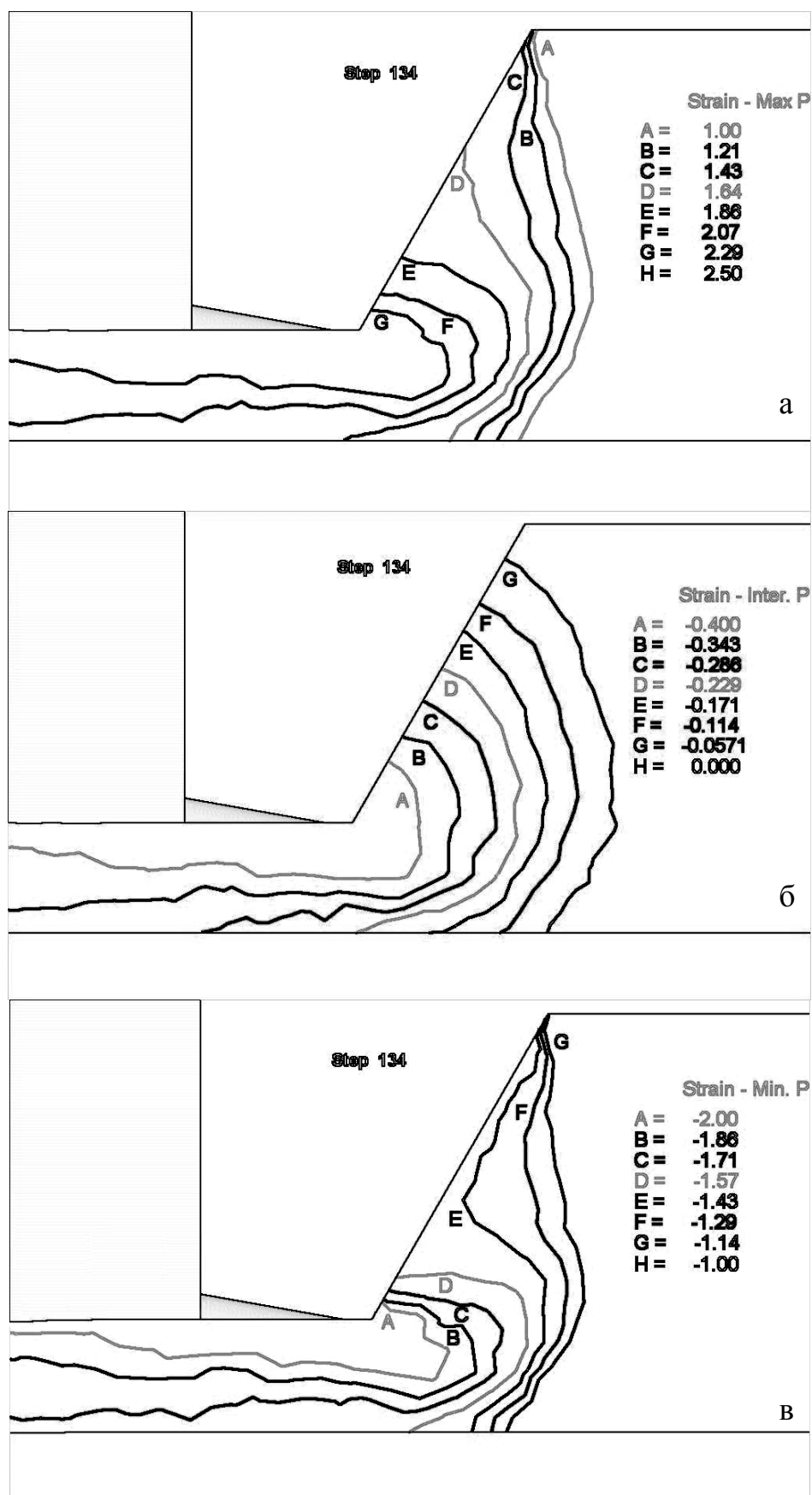


Рис. 4.12. Эпюры распределения главных деформаций при изотермической постановке задачи прессования трубной заготовки №2: а -  $\varepsilon_{11}$ , б -  $\varepsilon_{22}$ , в -  $\varepsilon_{33}$

В правом углу рисунков приведены соответствия между буквенными обозначениями и числовыми значениями деформаций.

Как видно из эпюр, линии равных уровней после выхода из очага деформации имеют достаточно плавную форму без резких изменений, что говорит о стабильности процесса, т.е. о достижении стационарной стадии прессования.

Сравнение эпюр распределения деформаций для изотермической постановки и с учетом процессов теплопередачи позволило выявить несколько моментов:

- Картины распределения степеней деформаций для обоих случаев качественно совпадают.
- Значения главных деформаций для внешней поверхности трубной заготовки после выхода из очага деформации практически равны для обеих постановок.
- Значения главных деформаций для внутренней поверхности трубной заготовки заметно отличаются, большие значения соответствуют изотермической постановке. Последнее можно объяснить наличием захлаживания металла в приконтактной с иглой области и, как следствие, увеличения сопротивления деформации.

Таким образом, изотермическая постановка приводит к получению несколько иных значений главных деформаций и увеличивает погрешность вычислений. Поэтому для дальнейших расчетов использовали постановку с учетом процессов теплопередачи.

Как показано в разделах 2 и 3 текстура трубы характеризуется обратными полюсными фигурами, построенными для трех взаимно перпендикулярных направлений в трубе: радиального, тангенциального и продольного (для этих же целей можно использовать и параметры Кернса:  $f_r, f_\phi, f_z$ ).

Таким образом, необходимо определить значения деформаций для этих же трех направлений с целью оценки текстуры по деформированному состоянию.

Для этого необходимо определить главные деформации и главные направления и по формуле пересчета, принятой в теории деформированного состояния определить  $\epsilon_{rr}, \epsilon_{\phi\phi}, \epsilon_{zz}$ .

Главные деформации для трубной заготовки определяли для пяти точек, расположенных по толщине трубы таким образом, что первая точка находилась на внешней стороне трубы, пятая – на внутренней, остальные между ними. Ввели понятие безразмерного радиуса трубной заготовки  $\bar{R} = r / R_1$ . Полученные данные заносили в таблицу 4.2.

Вследствие того, что процесс прессования трубной заготовки является осесимметричным, деформация  $\epsilon_{\phi\phi}$  – является главной и соответствует  $\epsilon_{22}$ .

Угол между  $\varepsilon_{11}$  и  $\varepsilon_{zz}$  равный углу между  $\varepsilon_{33}$  и  $\varepsilon_{rr}$  определялся из векторного представления главных деформаций (рис. 4.13).

Таблица 4.2

Распределение деформаций по стенке трубы с  $D_1=129$  мм

| Параметр                       | $r/R_1$ |       |       |       |       |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 1,00    | 0,94  | 0,86  | 0,78  | 0,71  |
| $\varepsilon_{11}$             | 2,81    | 2,60  | 2,15  | 1,82  | 1,75  |
| $\varepsilon_{22}$             | -0,50   | -0,47 | -0,39 | -0,31 | -0,25 |
| $\varepsilon_{33}$             | -2,28   | -2,10 | -1,74 | -1,50 | -1,48 |
| $\varepsilon_{zz}$             | 1,54    | 1,43  | 1,18  | 0,99  | 0,94  |
| $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ | -0,50   | -0,47 | -0,39 | -0,31 | -0,25 |
| $\varepsilon_{rr}$             | -1,01   | -0,93 | -0,77 | -0,67 | -0,67 |

Перерасчет компонентов тензора деформаций при повороте системы координат вокруг оси  $z$  на  $60^\circ$  производили по формуле (3.2), применяемой в тензорном анализе.

$$\varepsilon_{ij} = a_{ii'} a_{jj'} \varepsilon_{i'j'}, \quad (4.1)$$

где  $a_{ii'} (i, i' = x, y, z)$ ,  $a_{jj'} (j, j' = x, y, z)$  – компоненты матрицы перехода.

На основе полученных данных вычислены  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ , значения которых приведены в табл. 4.2.

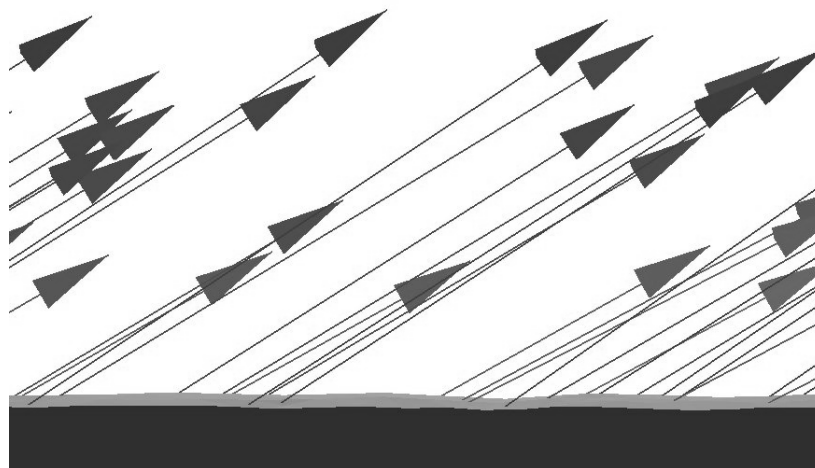


Рис. 4.13. Векторы главных деформаций  $\varepsilon_{11}$

Как показано в табл. 4.2, отрицательными деформациями (укорочения) являются  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ , соответственно именно вдоль направлений  $r$  и  $\varphi$  будут располагаться нормали к базисным плоскостям кристаллитов. Таким образом, можно сделать вывод, что в данном процессе будет достигнута радиально-тангенциальная структура. Более точно о ее типе



можно судить по отношению  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi}}$ . Однако это отношение имеет один недостаток: при значениях  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$  близких к 0, значение  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi}}$  будет стремиться к  $\infty$ , что неудобно использовать в расчетах. Поэтому в качестве альтернативы параметра, характеризующего текстуру, введем  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$ . Этот показатель нормирован в области  $0 < \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} < 1$ . Если это отношение больше 0,5, то будет получена текстура с сильнее выраженной радиальной компонентой, если меньше 0,5, то с тангенциальной. На рис. 4.14 приведены диаграммы распределения  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$  по стенкам труб с наружными диаметрами  $D_1=88$  мм,  $D_1=129$  мм.

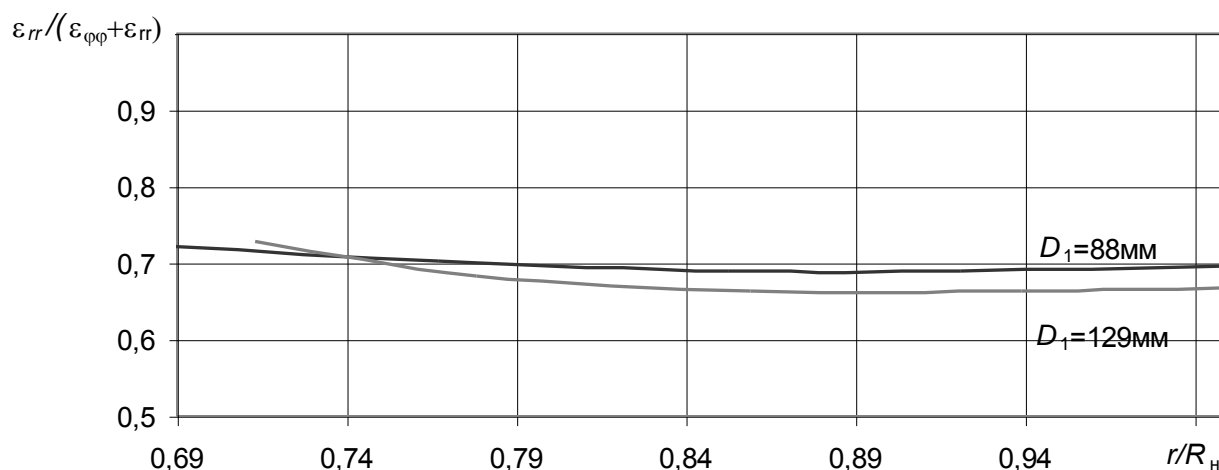


Рис. 4.14. Эпюра отношений деформаций укорочения по стенкам труб

Из этого рисунка видно, что в обеих трубах текстура радиально-тангенциальная, с более сильной радиальной компонентой. Причем в трубе с меньшим наружным диаметром текстура более радиальная. Это соответствует результатам обработки ОПФ, приведенным во втором и третьем разделах, где установлено, что значения параметров Кернса для трубы  $D_1=129$  мм:  $f_r = 0,40$ ,  $f_\varphi = 0,55$ , для трубы с  $D_1=88$  мм:  $f_r = 0,42$ ,  $f_\varphi = 0,45$ . Соответственно в трубе с меньшим наружным диаметром создана более радиальная текстура.

По данным табл. 4.2 также можно судить об остроте текстуры, которая определяется значением максимальной положительной деформации (удлинения). Значения  $\varepsilon_{11}$  для внешней поверхности трубы

превышает  $\varepsilon_{11}$  для внутренней поверхности более чем в 1,5 раза, соответственно на внешней поверхности стенки и текстура будет острее. Это соответствует результатам рентгеновского исследования трубы с  $D_1=129$  мм, представленными на рис. 4.15. Согласно рис 4.15 (б, в) текстура на внешнем (полюсная плотность  $P_{hkl}^{max}=7,9$ ) радиусе трубной заготовки более острая, чем на внутреннем ( $P_{hkl}^{max}=3,8$ ).

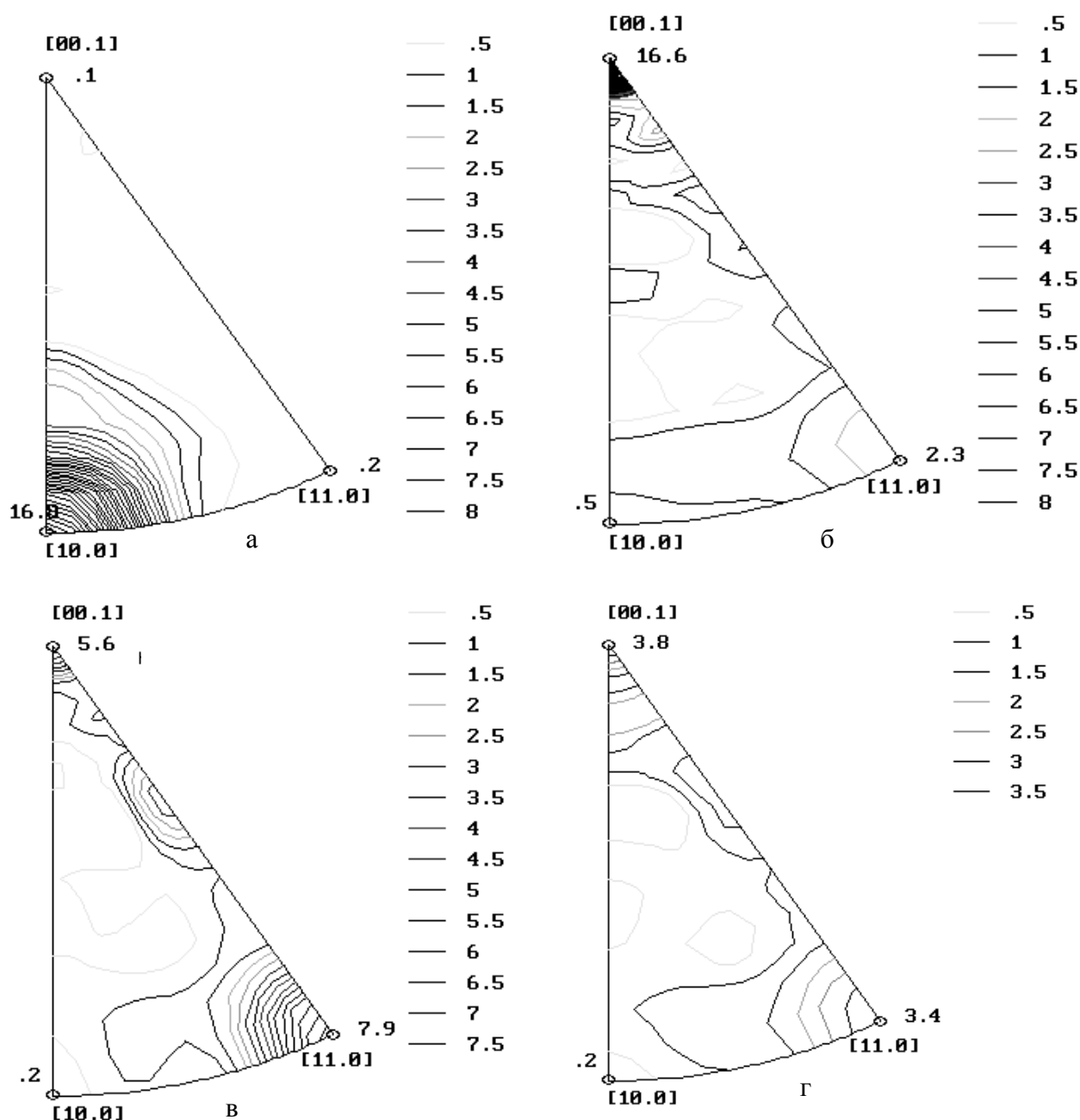


Рис. 4.15. Обратные полюсные фигуры, построенные для плоскостей, перпендикулярных продольному (а), тангенциальному (б) и радиальным направлениям на наружной (в) и внутренней (г) части трубной заготовки с наружным диаметров  $D_1=129$  мм

Необходимо отметить тот факт, что согласно рис. 4.15 текстура в обеих трубах должна иметь более сильную радиальную компоненты, а согласно ОПФ более сильной компонентой является тангенциальная.

Это можно объяснить наличием в кованных заготовках перед прессованием первоначальной тангенциальной текстуры. Во время прессования не происходит полное перераспределение кристаллитов.

#### 4.3. Построение полнофакторного плана и проведение вычислительного эксперимента с варьированием параметров

Как было показано в предыдущем параграфе, отношение  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$  является определяющим для формирования текстуры при прессовании трубной заготовки. Поэтому необходимо найти рычаги управления текстурой – параметры прессования, изменение которых приводит к изменению этого отношения.

В соответствии с основными положениями теории моделирования сформируем для указанных параметров функцию, в число аргументов которой включим максимальное количество возможных аргументов:

$$\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} = f(\lambda, D_{0B}, D_{0H}, D_{1B}, D_{1H}, \alpha, r), \quad (4.2)$$

где  $r$  – текущий радиус,  $\lambda$  – коэффициент вытяжки,  $D_{0B}$ ,  $D_{1B}$  – внешние диаметры трубной заготовки соответственно до и после прессования,  $D_{0H}$ ,  $D_{1H}$  – внутренние диаметры трубной заготовки до и после прессования,  $\alpha$  – угол наклона матрицы. Вследствие моделирования процесса прессования без учета этапа распрессовки, примем  $D_{0B} = D_{1B} = D_{и}$ . Внешний диаметр трубной заготовки до прессования можно рассчитать по формуле:  $D_{0H} = \sqrt{\lambda \cdot (D_{1H}^2 - D_{1B}^2) + D_{0B}^2}$ . С помощью последней формулы исключим один из аргументов, в результате в правой части уравнения (4.2) остается лишь пять независимых параметров, причем три из них  $r$ ,  $D_{1H}$ ,  $D_{1B}$  – являются размерными. Сформируем из них безразмерные комплексы  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$  и  $r/R_H = r/(D_{1H}/2)$ . Уравнение (4.2) можно привести к виду:

$$\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} = f\left(\lambda, \frac{D_{1B}}{D_{1H}}, \alpha, r/R_H\right), \quad (4.3)$$

Параметр  $r/R_H$  является текущей координатой, которая будет изменяться в ходе решения задачи, ее изменение планировать не надо.

Согласно теории планирования полнофакторного эксперимента для построения линейного уравнения регрессии трехпараметрической зависимости (4.3) необходимо провести  $2^3=8$  опытов с варьированием

каждого из трех вышеприведенных факторов на двух уровнях [87, 88]. Ограничение области определения каждого из них осуществлено исходя из заводской практики ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

В качестве базовой для последующих расчетов выбрана трубная заготовка с внешним диаметром  $D_I=145$  мм и возможными значениями толщины стенки от 15 до 35 мм. Эта заготовка входит в сортамент трубного производства ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» [89], относительно ее размеров сформированы максимальные пределы изменения  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$  от 0,52 до 0,79.

Из производственной практики установим, что коэффициент вытяжки  $\lambda$  при прессовании трубных заготовок может изменяться от 3 до 6. Такие значения согласно теории прессования являются довольно низкими, однако их применение в трубном производстве ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» является обоснованным. Во-первых, процесс прессования труб из титановых сплавов проводится при температурах лишь на 20-40° ниже температуры полиморфного превращения при превышении которой начинается рост крупного  $\beta$  зерна, устранить которое последующей обработкой уже не представляется возможным. Таким образом, малый коэффициент вытяжки способствует уменьшению деформационного разогрева. Во-вторых, основной целью операции прессования является получение заданных размеров трубной заготовки для ее дальнейшей прокатки на станах ХПТ, где и производится устранение неоднородности деформации. В-третьих, на прессование заготовка поступает после операцийковки, большое число которых позволяет получить мелкий размер зерна и малую остаточную неоднородность.

В производственных условиях значение угла матрицы принято равным 60°, примем его в качестве верхней границы параметра, в качестве нижней границы назначим угол в 45° – величину, которую можно встретить в практике прессования других сплавов.

На основе вышеприведенных границ определения трех независимых факторов построен план полнофакторного эксперимента (табл. 4.3).

Из табл. 4.3 видно, что для осуществления активного трехфакторного эксперимента необходимо провести 8 опытов по моделированию прессования.

В системе DEFORM-3D осуществлено моделирование прессования для всех восьми вариантов. При постановке задачи обеспечивали совпадение всех параметров прессования за исключением варьируемых. Для устранения дополнительных погрешностей и упрощения расчета при разбиении заготовки использовалась сетка с одним и тем же количеством конечных элементов, при этом число шагов и величина шага принималось одинаковыми для всех случаев.

Таблица 4.3

План полнофакторного эксперимента

| № опыта | Параметр                |           |          |
|---------|-------------------------|-----------|----------|
|         | $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$ | $\lambda$ | $\alpha$ |
| 1       | 0,52                    | 3         | 0,785    |
| 2       | 0,79                    | 3         | 0,785    |
| 3       | 0,52                    | 6         | 0,785    |
| 4       | 0,79                    | 6         | 0,785    |
| 5       | 0,52                    | 3         | 1,047    |
| 6       | 0,79                    | 3         | 1,047    |
| 7       | 0,52                    | 6         | 1,047    |
| 8       | 0,79                    | 6         | 1,047    |

Во время расчета следили за количеством дополнительных шагов, на которых вследствие большого искажения сетки, осуществлялось ее переразбиение («remeshing»). Если к концу процесса прессования (на последних 20 шагах) на каждое переразбиение приходилось только 2-3 расчетных шага, то такое вычисление признавали неудовлетворительным и расчет останавливали. Причиной этого является негативный эффект операции «remeshing», приводящий к усреднению значений деформаций и других параметров.

С такой ситуацией столкнулись в двух расчетах. Для ее исправления пришлось возвратиться на этап постановки задачи и уменьшить размер конечного элемента. Это достигнуто двумя приемами: небольшим уменьшением объема исходной заготовки и незначительным увеличением количества конечных элементов. Таким образом, после нескольких попыток достигли приемлемого решения для обоих случаев прессования.

В результате получено решение для всех восьми вариантов постановки задачи.

#### 4.4. Зависимость между параметрами текстуры и параметрами прессования

Анализ результатов экспериментов проводили по схеме, представленной выше:

- построение эпюр главных деформаций  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$ ,  $\varepsilon_{33}$ ,
- расчет деформаций  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  и проверка их знака,
- построение эпюр распределения  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$  деформаций укорочения по стенке трубы,

- определение отношения  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$  и построения графиков его распределения.

Эпюры распределения  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  качественно совпадают для всех восьми вариантов деформаций (рис. 4.16).

Хордовая (тангенциальная) деформация достигает своего наименьшего значения на внешнем радиусе трубы и убывает практически по линейному закону до значений близких к 0 на внутреннем радиусе. То, что значение  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$  на внутренней стенке трубы не равно 0, является особенностью расчета методом конечных элементов, и связано с дискретным представлением параметров в узлах сетки конечных элементов.

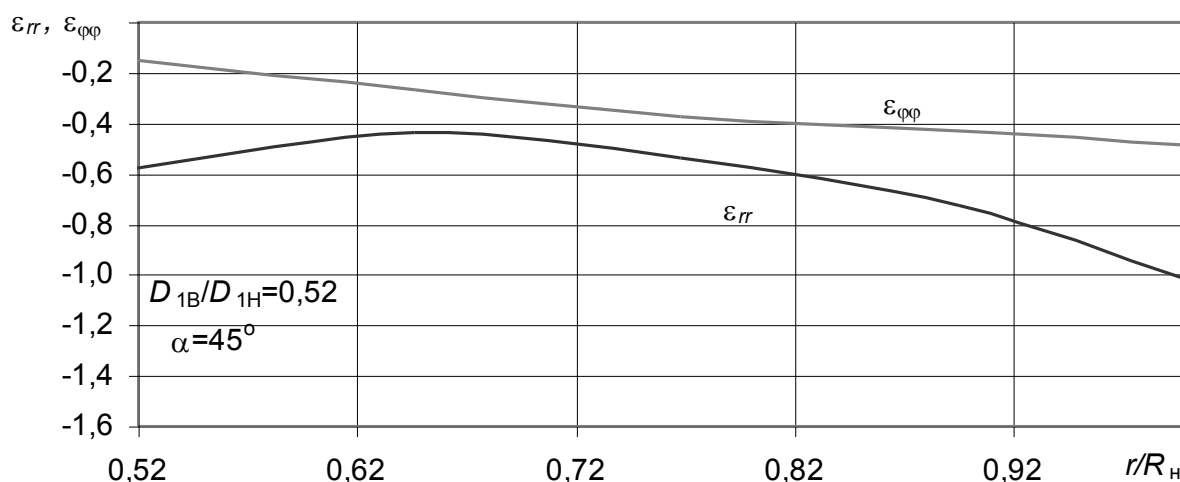


Рис. 4.16. Эпюра распределения хордовых и радиальных деформаций по стенке трубы при  $\lambda=3$

Радиальная деформация достигает минимальных значений на внешнем радиусе трубы и убывает примерно до значений радиуса  $r=0,57-0,65$  от  $R_H$  для трубы с  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}=0,52$  и до  $r=0,82-0,84$  от  $R_H$  для трубы с

$\frac{D_{1B}}{D_{1H}}=0,79$  и затем снова уменьшается до внутреннего радиуса, при этом, не достигая значений  $\varepsilon_{zz}$  на наружном радиусе. Эта форма особенно характерна для более толстостенного варианта трубы и менее выражена на тонкостенном (рис. 4.17).

Причиной такого явления может являться повышенная неоднородность деформации толстостенных труб, вызванная действием сил трения со стороны иглы и захолаживанием приконтактной зоны.

Изменение угла матрицы от  $60^\circ$  до  $45^\circ$  не оказывает существенного влияния на характер эпюр распределения радиальных и хордовых деформаций по стенке трубы (рис. 4.16, рис. 4.18) однако приводит к небольшому (3-5%) увеличению  $\varepsilon_{rr}$ .

Увеличение коэффициента вытяжки с 3 до 6 приводит к увеличению по абсолютному значению радиальных и хордовых деформаций в среднем на 30-50% (рис. 4.16, рис. 4.19). При этом характер кривых распределения не меняется, они просто смещаются ниже в отрицательную область.

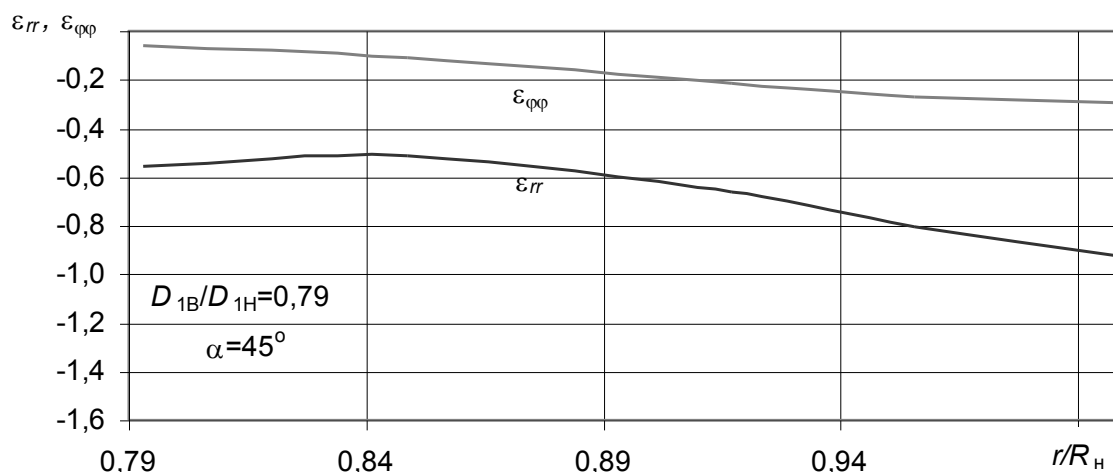


Рис. 4.17. Эпюры распределения хордовых и радиальных деформаций по стенке трубы при  $\lambda=3$

Характер эпюр распределения величины  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\phi\phi} + \varepsilon_{rr}}$  для всех восьми случаев также качественно совпадает. Наибольшее значение это отношение достигает на внутренней стенке трубы, затем оно уменьшается и достигает минимального значения, после чего опять начинается рост этой величины, которая достигает на внутренней стенке значения меньшего, чем на внутренней (рис. 4.20).

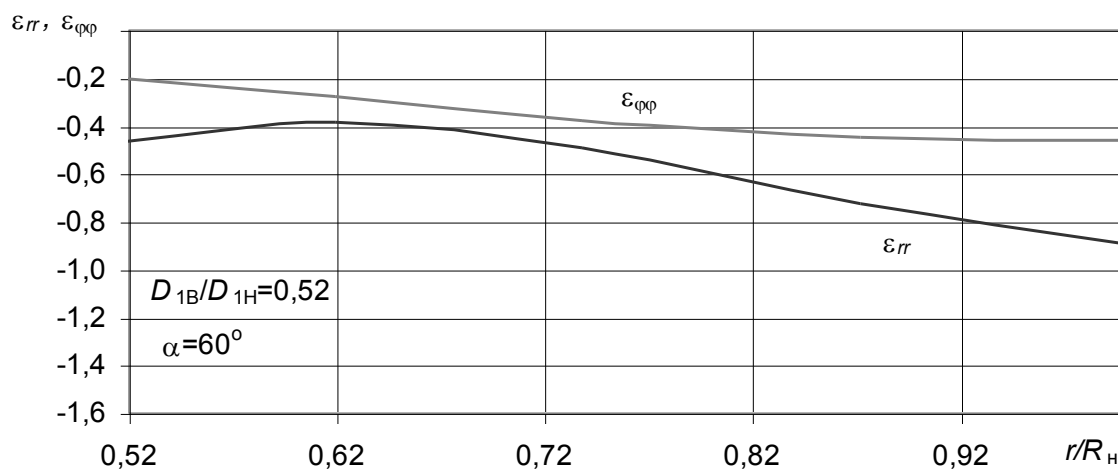


Рис. 4.18. Эпюры распределения хордовых и радиальных деформаций по стенке трубы при  $\lambda=3$

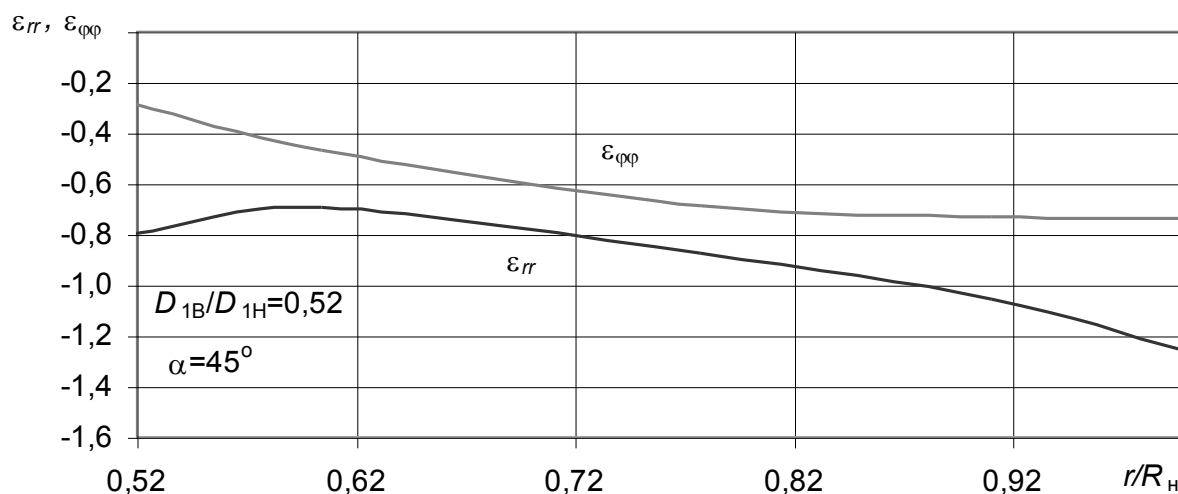


Рис. 4.19. Эпюры распределения хордовых и радиальных деформаций по стенке трубы при  $\lambda=6$



Увеличение коэффициента вытяжки  $\lambda$  приводит к уменьшению параметра  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$  (рис. 4.21). К такому же эффекту приводит и увеличение угла наклона матрицы (рис. 4.21). Напротив, увеличение  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$  приводит к увеличению отношения  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$  (рис. 4.22). Таким образом, более тонкостенные трубы будут иметь текстуру с более сильной радиальной компонентой.

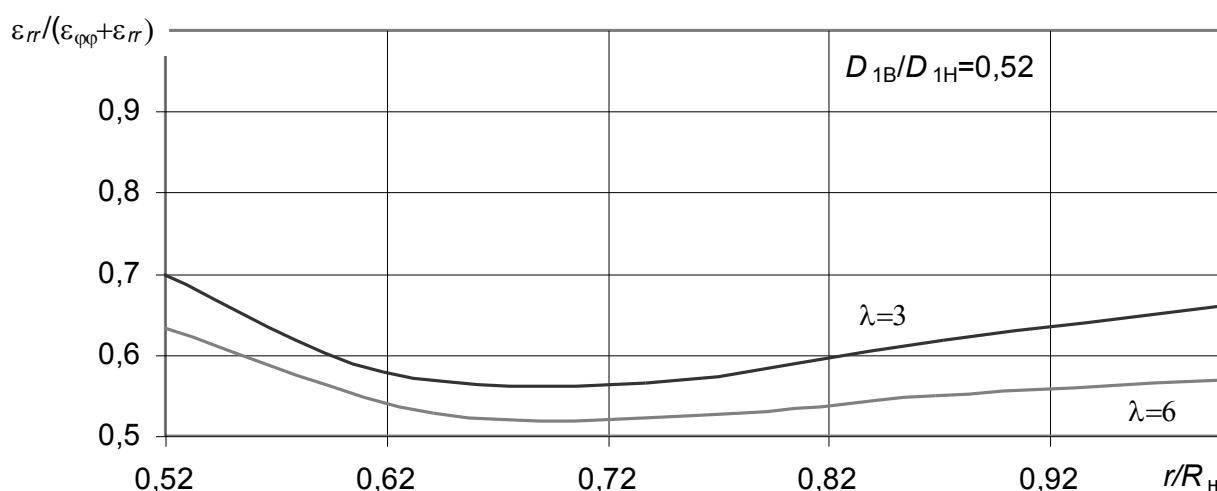


Рис. 4.20. Эпюра отношения деформаций укорочения по стенке трубы при прессовании с углом матрицы  $\alpha=60^\circ$

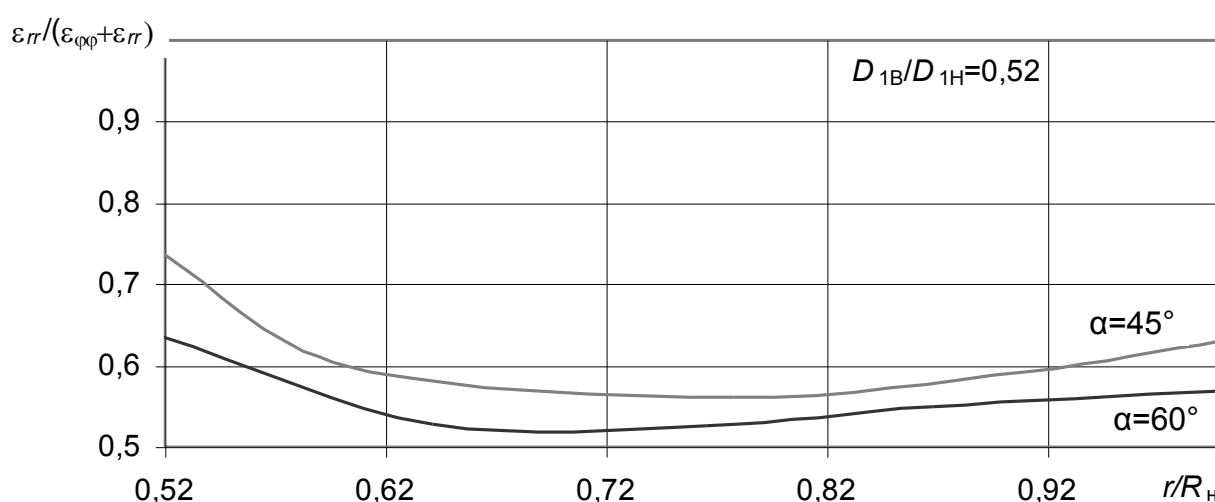


Рис. 4.21. Эпюра отношения деформаций укорочения по стенке трубы при прессовании с коэффициентом вытяжки  $\lambda=6$

Для изучения влияния факторов  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$ ,  $\lambda$  и  $\alpha$  на отношение  $\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$  построим уравнения регрессии. В табл. 4.3 представлены приведенные к единичному виду (нормированные) факторы и значения откликов для всех восьми экспериментов. В этой таблице значения  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  соответствуют факторам  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$ ,  $\lambda$  и  $\alpha$ ,  $Y_1 = \left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_{\text{сред}}$  – среднему интегральному значению по стенке трубы,  $Y_2 = \left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_H$  – значению на наружной поверхности трубы,  $Y_3 = \left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_B$  – на внутренней стенке трубы,  $Y_4 = \left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_{\min}$  – минимальному значению.

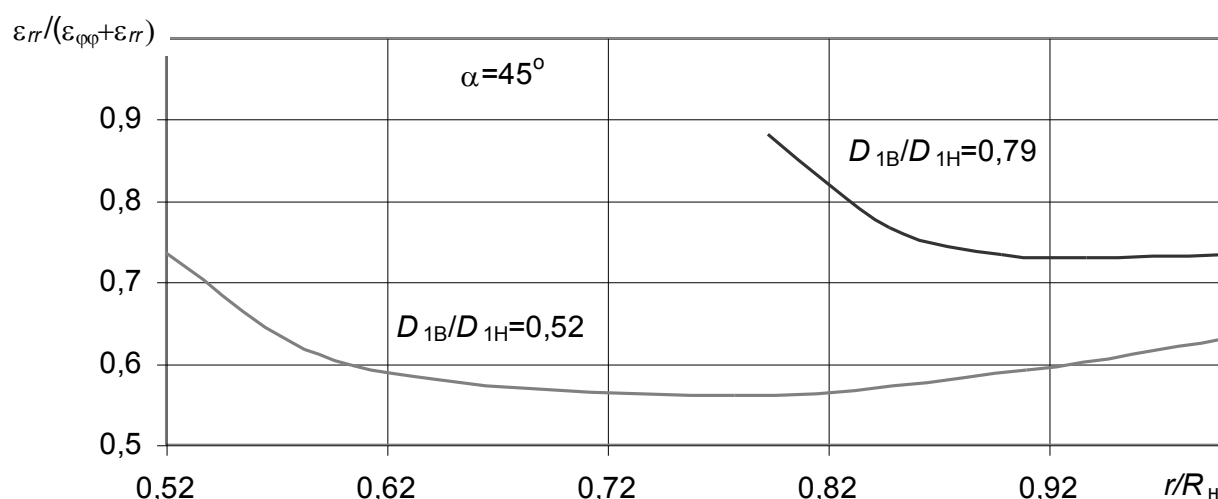


Рис. 4.22. Эпюра отношения деформаций укорочения по стенке трубы при  $\lambda=6$

В результате обработки полученных экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 0,69 + 0,08X_1 - 0,02X_2 - 0,02X_3, \quad (4.4)$$

$$Y_2 = 0,69 + 0,05X_1 - 0,03X_2 - 0,01X_3, \quad (4.5)$$

$$Y_3 = 0,79 + 0,07X_1 - 0,02X_2 - 0,04X_3, \quad (4.6)$$

$$Y_4 = 0,64 + 0,09X_1 - 0,02X_2 - 0,01X_3. \quad (4.7)$$

Значения коэффициента множественной корреляции для этих уравнений изменяются от 0,95 до 0,99. Проверка этого коэффициента по

критерию Фишера показала, что он статистически значим, что свидетельствует об адекватности математических моделей.

Таблица 4.3

Значения факторов и функций

| № опыта | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $Y_1$ | $Y_2$ | $Y_3$ | $Y_4$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | -1    | -1    | -1    | 0,66  | 0,68  | 0,80  | 0,59  |
| 2       | 1     | -1    | -1    | 0,80  | 0,76  | 0,90  | 0,74  |
| 3       | -1    | 1     | -1    | 0,62  | 0,63  | 0,74  | 0,56  |
| 4       | 1     | 1     | -1    | 0,77  | 0,73  | 0,88  | 0,73  |
| 5       | -1    | -1    | 1     | 0,62  | 0,66  | 0,70  | 0,56  |
| 6       | 1     | -1    | 1     | 0,78  | 0,76  | 0,84  | 0,76  |
| 7       | -1    | 1     | 1     | 0,56  | 0,57  | 0,64  | 0,51  |
| 8       | 1     | 1     | 1     | 0,74  | 0,70  | 0,81  | 0,70  |

Из уравнений (4.4-4.7) следует, что наибольшее влияние на отклики оказывает фактор  $X_1$ , при увеличении его значения растут и значения  $Y_i (i=1..4)$ . Влияние факторов  $X_2$  и  $X_3$  совпадает как по значению, так и по знаку, при этом оно примерно в 2-3 раза слабее, чем влияние фактора  $X_1$ . При увеличении значений  $X_2$  и  $X_3$  величины откликов уменьшаются.

Для удобства использования при расчетах уравнений (4.4-4.7) запишем их в следующем виде:

$$\left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_{\text{сред}} = 0,514 + 0,569 \frac{D_{1B}}{D_{1H}} - 0,014\lambda - 0,140\alpha \quad (4.8)$$

$$\left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_H = 0,601 + 0,390 \frac{D_{1B}}{D_{1H}} - 0,005\lambda - 0,055\alpha \quad (4.9)$$

$$\left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_B = 0,809 + 0,517 \frac{D_{1B}}{D_{1H}} - 0,014\lambda - 0,322\alpha \quad (4.10)$$

$$\left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_{\min} = 0,348 + 0,657 \frac{D_{1B}}{D_{1H}} - 0,004\lambda - 0,050\alpha \quad (4.11)$$

В этих уравнениях величина  $\alpha$  выражена в радианах.

По величине коэффициентов уравнения регрессии можно установить, что наибольшее влияние оказывает отношение  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$ . На втором месте по значимости оказывается угол матрицы, а на третьем – коэффициенты вытяжки. Наибольшее влияние угол матрицы оказывает на текстуру внутреннего волокна трубной заготовки.

На рис. 4.23 показаны графики, иллюстрирующие влияние факторов  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}}$ ,  $\lambda$  и  $\alpha$  на  $\left( \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}} \right)_{\text{сред}}$ .

Из данного рисунка видно, что при всех приведенных значениях факторов величина отношения деформаций укорочения больше 0,5, что говорит о получении в металле радиально-тангенциальной текстуры с более сильной радиальной компонентой.

Как показано в разделе 2, для устранения разнотолщинности при холодной прокатке труб необходимо после операции прессования в трубной заготовке получить радиальную текстуру. Увеличению доли радиальной текстуры способствует уменьшение угла матрицы и уменьшение коэффициента вытяжки.

Также можно отметить, что при уменьшении толстостенности прессуемой трубной заготовки доля нормалей к базовым плоскостям кристаллитов, ориентированных в направлении радиуса трубы будет увеличиваться.

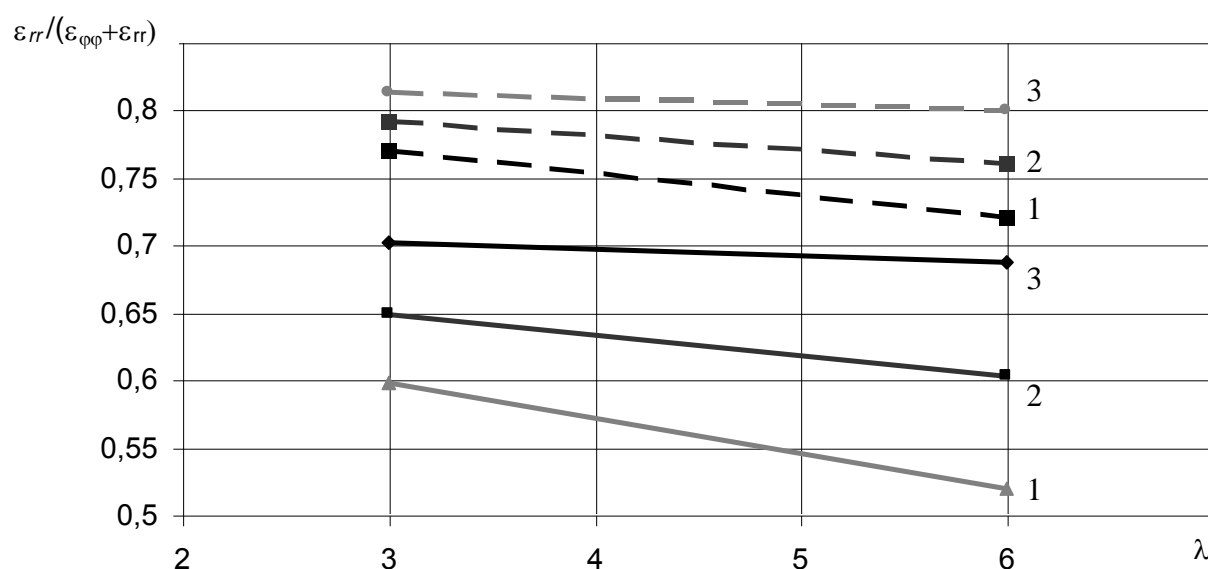


Рис. 4.23. Зависимость отношения деформаций укорочения от трех варьируемых параметров: угол волокна равен 70° (1), 50° (2), 30° (3).

Штриховыми линиями показана картина распределения при  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}} = 0,79$ ,

сплошными линиями – при  $\frac{D_{1B}}{D_{1H}} = 0,52$

Таким образом, параметрами, отвечающими за формирование текстуры при прессовании, являются отношение наружного и внутреннего диаметров заготовки, коэффициент вытяжки и угол наклона образующей матрицы.

### Библиографический список

1. Murty, K. L. Texture development and anisotropic deformation of zircalloys [Текст] / K. L. Murty, I. Charit // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – V. 48. – P. 325–359.
2. Dillamore, I.L. Preferred orientations in wrought and annealed metals [Текст] / I. L. Dillamore, W.T. Roberts // Metals Reviews. – 1965. – V. 10. – P. 271.
3. Ballinger, R.G. The effects of plastic strain on the evolution of crystallographic texture in zircaloy-2 [Текст] / R.G. Ballinger, G.E. Lucas, R.M. Pelloux // Journal of Nuclear Materials. – 1984. – V. 126. – P. 53.
4. Tenckhoff, E. Deformation mechanisms, texture, and anisotropy in zirconium and zircaloy [Текст] / E. Tenckhoff. – USA, Philadelphia, ASTM 966, PA, 1988.
5. Mahmood, S.T. Localized plastic flow, anisotropic mechanical properties and crystallographic texture in zircaloy sheet [Текст] S.T. Mahmood, K.L. Murty // Journal of Materials Engineering. – 1989. – V. 11. – P. 315.
6. Murty, K.L. Applications of crystallographic textures of zirconium alloys in the nuclear industry [Текст] / K.L. Murty // Zirconium in the Nuclear Industry: Eighth International Symposium. – ASTM STP 1023. 1989. – P. 570.
7. Forney, C.E. Ti 3Al 2,5V seamless tubing engineering guide [Текст] / C.E. Forney, H.S. Schemel. – Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1987. – 115 p.
8. Патент США № 3804708. Nuclear reactor fuel rod. Apl. United Nuclear Corporation. W. G. Nilson. Заявл. 24.10.1971. Оpubл. 16.04.1974. МКИ G21C 3/06.

9. Патент США № 4390497. Thermal-mechanical treatment of composite nuclear fuel element cladding. Apl. General Electric Company. H. S. Rosenbaum, J. H. Davies. Заявл. 21.10.1981. Оpubл. 28.01.1983. МКИ<sup>3</sup> G21C 3/20.
10. Патент США № 4452648. Low in reactor creep Zr-base alloy tubes. Apl. Atomic Energy of Canada Limited. B. A. Cheadle, R. A. Holt. Заявл. 29.06.1981. Оpubл. 05.06.1984. МКИ<sup>3</sup> C22F 1/18.
11. Патент США № 4765174. Texture enhancement of metallic tubing having a hexagonal close-packed crystal structure. Apl. Westinghouse Electric Corp. C. S. Cook, G. P. Sabol. Заявл. 20.02.1987. Оpubл. 23.08.1988. МКИ<sup>4</sup> B21C 37/30.
12. Патент США № 4990305. Single peak radial texture zircaloy tubing. Apl. Westinghouse Electric Corp. J. P. Foster, C. S. Cook, G. P. Sabol. Заявл. 28.06.1989. Оpubл. 05.02.1991. МКИ<sup>5</sup> G21C 3/32.
13. Патент США № 5681406 Manufacturing method of delayed hydride cracking resistant seamless pressure tube made of zirconium (Zr) alloy. Apl. Korea Atomic Energy Research Institute. Sung-Soo Kim; Dae-Whan Kim; Jun-Hwa Hong; Young-Hwan Kang. Заявл. 25.05.1994. Оpubл. 28.10.1997. МКИ<sup>6</sup> C22C 16/00.
14. Патент США № 5305359. Dimensionally stable and corrosion-resistant fuel channels and related method of manufacture. Apl. General Electric Company. R. B. Adamson, D. C. Bartosik, E. B. Johansson, C. D. Williams. Заявл. 13.05.1993. Оpubл. 19.04.1994. МКИ<sup>5</sup> G21C 21/00.
15. Патент США № 5361282. Dimensionally stable and corrosion-resistant fuel channels and related method of manufacture. Apl. General Electric Company. R. B. Adamson, D. C. Bartosik, E. B. Johansson, C. D. Williams. Заявл. 13.05.1993. Оpubл. 01.11.1994. МКИ<sup>5</sup> G21C 3/32.

16. Tenckhoff, E. A review of texture and texture formation in zircaloy tubing [Текст] / E. Tenckhoff // Zirconium in the Nuclear Industry: Fifth Conference. – ASTM STP 754. 1982. – P. 5.
17. Tenckhoff, E. A review of deformation mechanism, texture and mechanical anisotropy in zirconium and zirconium-base alloys [Текст] / E. Tenckhoff // Journal of ASTM International. – 2005. – V. 2. – P. 1.
18. Hussien, S. Texture and mechanical anisotropy gradients in recrystallized zircaloy TREX [Текст] / S. Hussien, S.T. Mahmood, K.L. Murty // Eighth International Conference on Textures of Materials [ICOTOM8]. – 1988.
19. Shemel, J.H. Pilger tooling design for texture control [Текст] / J.H. Shemel, R.W. McKenzie // Zirconium in nuclear application. – ASTM STP-551. – 1978. – P. 39-45.
20. Rees, T.W. The development and control of crystallographic texture in 3Al-2,5V titanium alloy tubing [Текст] / T.W. Rees // Criteria for current and advanced aircraft hydraulic tubing. Sp-378. / Society of automotive engineers Inc. 1978. – P. 31-38.
21. Патент США № 5226981. Method of manufacturing corrosion resistant tubing from welded stock of titanium or titanium base alloy. Apl. Sandvik Special Metals Corporation. Steven E. Meredith, James F. Benjamin. Заявл. 28.01.1992. Опубл. 13.07.1993. МКИ<sup>5</sup> C22C 14/00.
22. Патент США № 5332454. Titanium or titanium base alloy corrosion resistant tubing from welded stock. Apl. Sandvik Special Metals Corporation. Steven E. Meredith, James F. Benjamin. Заявл. 09.03.1993. Опубл. 26.07.1994. МКИ<sup>5</sup> C22C 14/00.
23. Materials properties handbook: Titanium Alloys [Текст] / Edited by R. Boyer, E.W. Collins, G. Welsch. – Washington: ASM International, 1994. – 1169 p.
24. W.F. Spurr. The effect of crystallographic texture on mechanical and fracture properties of Ti-3Al-2,5V hydraulic tubing [Текст] / W.F. Spurr,

- W.E. Quist // Criteria for current and advanced aircraft hydraulic tubing. Sp-378. / Society of automotive engineers Inc. 1978. – P. 46-54.
25. Физико-механические свойства легких конструкционных сплавов / Б.А. Колачев, С.Я. Бецоффен, Л.А. Бунин, В.А. Володин М.: Металлургия, 1995. 288 с.
  26. Рубина, Е.Б. Механизм пластической деформации титанового альфа-сплава титан-алюминий-ванадий [Текст] / Е.Б. Рубина, С.Я. Бецоффен // Физика металлов и металловедение. – 1990. – №4. – С. 191-198.
  27. Бецоффен, С.Я. О текучести текстурированных сплавов с ГПУ решеткой [Текст] / С.Я. Бецоффен, Е.Б. Рубина // Изв. АН СССР. Металлы. – 1989. – № 6. – С. 152-160.
  28. Закономерности формирования текстуры и анизотропии механических свойств в листах из титановых сплавов / С.Я. Бецоффен, А.А. Ильин, С.В. Скворцова и др. // Металлы. 2005. №2. С. 54-63.
  29. Бородкина, М. М. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов [Текст] / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
  30. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: Учебное пособие для вузов [Текст] / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М.: МИСИС, 2002. – 306 с.
  31. Kearns, J. J. Effect of texture, grain size, and cold work on the precipitation of oriented hydrides in Zircaloy tubing and plate. [Текст] / J. J. Kearns, C. R. Woods // Journal of Nuclear Materials. – 1966. – V. 20, № 3. – P. 241-261.
  32. Kearns, J. J. On the relationship among ‘f’ texture factors for the principal planes of zirconium, hafnium and titanium alloys. [Текст] / J. J. Kearns // Journal of Nuclear Materials. – 2001. – V. 299, № 2. – P. 171-174.
  33. Baron, J. L. Interlaboratories tests of textures of Zircaloy-4 tubes. Part 1: Pole figure measurement and calculation of Kearns coefficients [Текст] /



- J. L. Baron, C. Esling, J. L. Feron, D. Gex, J. L. Glimois // Textures and Microstructures. – 1990. – Vol. 12. – P. 125-140.
34. Kallstrom, K. Texture and anisotropy of zirconium in relation to plastic deformation. / K. Kallstrom // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1982. – №11. – P. 185.
35. AMS 4946. Titanium alloy tubing, seamless, hydraulic 3Al 2.5V, texture controlled cold worked, stress relieved. SAE International. – 2006.
36. Патент США № 4715053. Method for monitoring the crystallographic texture of metallic tubes by use of x-ray diffraction. Apl. Westinghouse Electric Corp. R. J. Comstock, G. P. Sabol. Заявл. 25.01.1985. Опубл. 22.12.1987. МКН<sup>4</sup> G01N 23/207.
37. Texture and hydride orientation relationship of Zircaloy-4 fuel clad tube during fabrication for pressurized heavy water reactors [Текст] / K. Vaibhaw, S.V.R. Rao, S.K. Jha, N. Saibaba, R.N. Jayaraj // Journal of Nuclear Materials. 2007. Режим доступа: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
38. ASTM B353-95. Standard Specification for Wrought Zirconium and Zirconium Alloy Seamless and Welded Tubes for Nuclear Service (Except Nuclear Fuel Cladding). ASTM International. – 1995.
39. AS 4076. Contractile strain ratio testing of titanium hydraulic tubing. SAE International. – 1987.
40. ASTM E8-04. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM International. – 2004.
41. AMS 4945 C. Titanium alloy tubing, seamless, hydraulic 3Al-2,5V, controlled contractile strain ratio, cold worked, stress relieved. SAE International. – 2006.
42. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов [Текст] / В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.

43. Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. Теория пластичности: Учебник для вузов [Текст] / Г. Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
44. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
45. Хилл, Р. Математическая теория пластичности [Текст] / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
46. Яковлев, С. П. Обработка давлением анизотропных материалов [Текст] / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. – Кишинев: Квант, 1997. – 331 с.
47. Арышенский, Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст] / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
48. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 393 с.
49. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред [Текст] / О. Зенкевич, И. Чанг. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
50. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 543 с.
51. Kobayashi, S. Metalforming and the Finite-Element Method [Текст] / S. Kobayashi, S.I. Oh, T. Altan. – Oxford: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
52. Design Environment for FORMing. Сайт компании Scientific Forming Technologies Corporation. Режим доступа: [www.deform.com](http://www.deform.com).
53. Буркин, С. П. Расчет технологических задач обработки давлением с помощью пакета прикладных программ «ПЛАСТ» методом

- конечных элементов. [Текст] / С. П. Буркин, Ю. Н. Логинов, С. В. Смирнов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1993. – 34 с.
54. Полищук, Е. Г. Система расчета пластического деформирования «РАПИД» [Текст] / Е. Г. Полищук, Д. С. Жиров, Р. А. Вайсбурд // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – №8. – С. 16-18.
55. Логинов, Ю.Н. Решение технологических задач прессования с применением системы анализа процессов пластического деформирования «РАПИД 2D»: учебно-методическое пособие. [Текст] / Ю.Н. Логинов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 78 с.
56. Биба Н.В. Разработка и применение программы моделирования трехмерной объемной штамповки QForm2D/3D. [Текст] / Н. В. Биба // САПР и графика. – 2001. – №9. – С. 18-19.
57. Автоматизированная система ФОРМ-2Д для расчета формоизменения в процессе штамповки на основе метода конечных элементов [Текст] / Г.Я. Гун, Н.В. Биба, О.Б. Садыхов и др // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – №9-10. – С. 15-18.
58. QForm3D. Сайт компании QUFANTOR form. Режим доступа [www.qform3d.ru](http://www.qform3d.ru).
59. Колачев, Б. А. Механические свойства титана и его сплавов [Текст] / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, А. А. Буханова. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
60. Колачев, Б. А. Газы в легких металлах [Текст] / Б. А. Колачев, Ю. В. Горшков, О. П. Назимов. // Труды МАТИ. Сб. № 71. – М.: Металлургия, 1970. – С. 12–15.
61. Проходцева Л. В., Дроздовский Б. А., Юрушкина Н. В. Анизотропия характеристик разрушения листов из сплавов ОТ4 и ОТ4-1. Цветные металлы. 1972. № 3. С. 72–73.
62. Логинов, Ю. Н. Исследование свойств титанового сплава Ti-3Al-2,5V с оценкой склонности к текстурообразованию. [Текст] /

- Ю. Н. Логинов, В. В. Котов, В. Г. Смирнов. Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: сб. тр. международной конф. – СПб, 2005. – С.281-284.
63. Котов В.В., Логинов Ю.Н. Изучение анизотропии свойств титанового сплава Grade 9. [Текст] / В сб.научных трудов 9 конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. Ч4. С. 57-61.
64. Котов, В.В. Анизотропия показателя твердости горяпрессованных труб из титанового сплава Grade 9. [Текст] / В. В. Котов, Ю. Н. Логинов // Сб. научных трудов 10 конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – Ч1. – С. 312-313.
65. Моделирование изменений разностенности труб при обжатии на оправке [Текст]/ О.И. Мижирицкий, А.А. Богатов, Г.А. Орлов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – №2. – С. 33-37.
66. Уменьшение разностенности при прокатке на профильных оправках станов ХПТ и ХПТР [Текст]/ О.И. Мижирицкий, Г.А. Орлов, А.М. Кузнецов и др. Сталь. – 1993. – №10. – С. 59-61.
67. Логинов, Ю. Н. Изучение связи между дифференциальными и интегральными прочностными характеристиками металлов [Текст] / Ю. Н. Логинов, Н. А. Бабайлов, В. В. Котов // Разрушение и мониторинг свойств металлов: тез. докл. 2 межд. конф., Екатеринбург, 26-30 мая 2003 г. / УрО РАН. – Екатеринбург, 2003. – С.52.
68. Логинов, Ю. Н. Изучение связи между дифференциальными и интегральными прочностными характеристиками металлов [Электронный ресурс] / Ю. Н. Логинов, Н. А. Бабайлов, В. В. Котов // Разрушение и мониторинг свойств металлов: материалы международной конференции, Екатеринбург, 26-30 мая 2003 г. / УрО

- РАН. – Екатеринбург, 2003. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) статья 96.
69. Логинов, Ю. Н. Влияние неоднородности и анизотропных свойств литой меди на процесс деформации трубных заготовок [Текст] / Ю. Н. Логинов, В. В. Котов // Достижения в теории и практике трубного производства: сб. тр. 1 Рос. конф. – Екатеринбург, 2004. – С. 252-259.
70. Котов, В. В. Исследование медной катанки, полученной методом непрерывного литья [Текст] / В. В. Котов, Ю. Н. Логинов // Сб. научных трудов 5 конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – С. 87.
71. Анизотропные свойства непрерывнолитой медной катанки электротехнического назначения [Текст] / Ю. Н. Логинов, Л. А. Мальцева, Л. М. Вырлина, Т. П. Копылова // Цветные металлы. – 2002. – №4. – С. 73-77.
72. Solovei V. D. Calculating radial textures in bushes made of the alloy Mn-Al-C upon upsetting into a container [Текст] / V. D. Solovei, Yu. N. Loginov // Textures and Microstructures. – 1999. – V. 32. – P.235-243.
73. Изготовление анизотропных магнитов с осевой текстурой из гранул сплава системы Mn-Al-C / Ю. Н. Логинов, А. Е. Ермаков, А. В. Шангуров [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – №8. – С.24-26.
74. Исследование формирования анизотропии магнитных свойств при осадке заготовок из сплавов системы Mn-Al-C / Ю.Н.Логинов, А.Е. Ермаков, А.В. Шангуров [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – №8. – С. 4-5.

75. SourceForge.Net: Lazarus. Сайт разработки бесплатного языка программирования для Linux, FreeBSD, MacOSX и Windows – Lazarus. Режим доступа: <http://sourceforge.net/projects/lazarus>.
76. Lazarus Code and Component Repository. Сайт размещения исходных кодов и компонентов языка Lazarus Режим доступа: <http://lazarus-ccr.sourceforge.net>.
77. The GNU Operating System. Сайт сообщества разработчиков бесплатного программного обеспечения Free Software Foundation. Режим доступа: <http://www.gnu.org>.
78. Михайленко, А.М. Обработка опытных данных. Статистические гипотезы и выводы: Учебное пособие / А. М. Михайленко, А. Р. Бондин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – 90 с.
79. Хайкин, Б.Е. Построение и анализ статистических распределений технологических параметров / Б. Е. Хайкин. – Свердловск: УПИ, 1984.
80. SolidWorks - 3D Mechanical Design and 3D CAD Software. Сайт компании SolidWorks Corporation. Режим доступа: [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com).
81. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – 351 с.
82. Шибанов, А. С. Основы математического моделирования формоизменения и эволюции зеренной структуры металла при обработке давлением / А.С. Шибанов, А.А. Богатов, И.В. Левин // Кузнецы Урала-2005: сб. тр. науч.-техн. конф. – В. Салда, 2005. – С. 9-25.
83. Влияние схемы и режимов прессовой протяжки слитков на неравномерности распределения температуры и накопленной деформации в поковке / А. С. Шибанов, В. А. Кропотов,

- В. Б. Тимохов, А. А. Богатов // Ti-2006: сб. тр. науч.-техн. конф. – Суздаль, 2006. – С. 181-186.
84. Исследование однородности деформации цилиндрической заготовки при различных схемах открытой осадки / А.С. Шибанов, А. Н. Трошин, И. В. Левин, А. А. Богатов // Ti-2006: сб. тр. науч.-техн. конф. – Суздаль, 2006. – С. 269-279.
85. Контактное трение и эффективность применения защитно-смазочных покрытий и технологических смазочных материалов при горячей объемной штамповке / А. Н. Леванов, В. К. Катая, И. М. Володин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – №2. – С. 133-138.
86. Леванов, А. Н. Общие закономерности и полезные эффекты контактного трения в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов // Кузнецы Урала-2005: сб. тр. науч.-техн. конф. – В. Салда, 2005. – С. 281-289.
87. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
88. Налимов, В.В. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – М.: Металлургия, 1981. – 152 с.
89. Трубы горячепрессованные: Продукция. Сайт Корпорации ВСМПО-АВИСМА. Режим доступа: <http://www.vsmpro.ru>.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЛЬФА И ПСЕВДО-АЛЬФА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Alpha/Near Alpha Titanium Alloy". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

| Physical Properties        | Metric                          | English                          | Comments  |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| Density                    | 4.31 - 4.84 g/cc                | 0.156 - 0.175 lb/in <sup>3</sup> | Average value: 4.50 g/cc<br>Grade Count:49                |
| Hardness, Brinell          | 256 - 334                       | 256 - 334                        | Average value: 305 Grade<br>Count:18                      |
| Hardness, Knoop            | 278 - 363                       | 278 - 363                        | Average value: 333 Grade<br>Count:18                      |
| Hardness, Rockwell C       | 24.0 - 36.0                     | 24.0 - 36.0                      | Average value: 31.3 Grade<br>Count:21                     |
| Hardness, Vickers          | 269 - 350                       | 269 - 350                        | Average value: 320 Grade<br>Count:20                      |
| Tensile Strength, Ultimate | 620 - 1180 MPa                  | 89900 - 171000 psi               | Average value: 886 MPa<br>Grade Count:49                  |
| Tensile Strength, Yield    | 480 - 1070 MPa                  | 69600 - 155000 psi               | Average value: 788 MPa<br>Grade Count:50                  |
| Elongation at Break        | 3.00 - 25.0 %                   | 3.00 - 25.0 %                    | Average value: 13.7 % Grade<br>Count:48                   |
| Reduction of Area          | 15.0 - 47.0 %                   | 15.0 - 47.0 %                    | Average value: 28.2 % Grade<br>Count:23                   |
| Modulus of Elasticity      | 100 - 125 GPa                   | 14500 - 18100 ksi                | Average value: 114 GPa<br>Grade Count:43                  |
| Compressive Yield Strength | 690 - 1080 MPa                  | 100000 - 157000 psi              | Average value: 881 MPa<br>Grade Count:8                   |
| Compressive Modulus        | 118 - 130 GPa                   | 17100 - 18900 ksi                | Average value: 125 GPa<br>Grade Count:3                   |
| Notched Tensile Strength   | 790 - 1650 MPa                  | 115000 - 239000 psi              | Average value: 1220 MPa<br>Grade Count:10                 |
| Ultimate Bearing Strength  | 1760 - 2000 MPa                 | 255000 - 290000 psi              | Average value: 1890 MPa<br>Grade Count:4                  |
| Bearing Yield Strength     | 1340 - 1620 MPa                 | 194000 - 235000 psi              | Average value: 1470 MPa<br>Grade Count:4                  |
| Poissons Ratio             | 0.300 - 0.330                   | 0.300 - 0.330                    | Average value: 0.311 Grade<br>Count:36                    |
| Charpy Impact              | 15.0 - 92.0 J                   | 11.1 - 67.9 ft-lb                | Average value: 40.5 J Grade<br>Count:17                   |
| Fatigue Strength           | 110 - 1000 MPa                  | 16000 - 145000 psi               | Average value: 425 MPa<br>Grade Count:25                  |
| Fracture Toughness         | 33.0 - 374 MPa-m <sup>1/2</sup> | 30.0 - 340 ksi-in <sup>1/2</sup> | Average value: 106 MPa-m <sup>1/2</sup><br>Grade Count:16 |
| Shear Modulus              | 40.1 - 48.0 GPa                 | 5820 - 6960 ksi                  | Average value: 44.4 GPa                                   |



|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|   |   |   | Grade Count:36  |
| Shear Strength                            | 520 - 690 MPa   | 75400 - 100000 psi                                      | Average value: 608 MPa<br>Grade Count:6   |
| Bend Radius, Minimum                      | 2.50 - 6.00 t   | 2.50 - 6.00 t   | Average value: 4.33 t Grade<br>Count:9  |
| Electrical Resistivity                    | 0.0000650 -<br>0.000198 ohm-cm                        | 0.0000650 -<br>0.000198 ohm-cm                          | Average value: 0.000150<br>ohm-cm Grade Count:39                                |
| CTE, linear                               | 7.70 - 11.3 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ | 4.28 - 6.28 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$ | Average value: 9.32 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$<br>Grade Count:41 |
| Specific Heat Capacity                    | 0.460 - 0.552 J/g- $^\circ\text{C}$                   | 0.110 - 0.132<br>BTU/lb- $^\circ\text{F}$               | Average value: 0.518 J/g- $^\circ\text{C}$<br>Grade Count:31                    |
| Thermal Conductivity                      | 4.15 - 13.0 W/m-K                                     | 28.8 - 90.2 BTU-<br>in/hr-ft $^2$ - $^\circ\text{F}$    | Average value: 7.75 W/m-K<br>Grade Count:42                                     |
| Melting Point                             | 1540 - 1710 $^\circ\text{C}$                          | 2800 - 3100 $^\circ\text{F}$                            | Average value: 1650 $^\circ\text{C}$<br>Grade Count:28                          |
| Liquidus                                  | 1540 - 1710 $^\circ\text{C}$                          | 2800 - 3100 $^\circ\text{F}$                            | Average value: 1640 $^\circ\text{C}$<br>Grade Count:27                          |
| Maximum Service<br>Temperature, Air       | 350 - 600 $^\circ\text{C}$                            | 662 - 1110 $^\circ\text{F}$                             | Average value: 506 $^\circ\text{C}$ Grade<br>Count:8                            |
| Beta Transus                              | 880 - 1110 $^\circ\text{C}$                           | 1620 - 2030 $^\circ\text{F}$                            | Average value: 994 $^\circ\text{C}$ Grade<br>Count:43                           |
|   |   |   |   |
| <b>Material Components<br/>Properties</b> | <b>Metric</b>   | <b>English</b>  | <b>Comments</b>   |
| Aluminum, Al                              | 2.25 - 8.00 %   | 2.25 - 8.00 %   | Average value: 5.35 % Grade<br>Count:47   |
| Carbon, C                                 | 0.0300 - 0.100 %                                      | 0.0300 - 0.100 %  | Average value: 0.0726 %<br>Grade Count:19                                       |
| Copper, Cu                                | 2.00 - 3.00 %   | 2.00 - 3.00 %   | Average value: 2.50 % Grade<br>Count:4  |
| H   | 0.00600 - 0.0150 %                                    | 0.00600 - 0.0150 %                                      | Average value: 0.0130 %<br>Grade Count:18                                       |
| Iron, Fe                                  | 0.0500 - 0.500 %                                      | 0.0500 - 0.500 %  | Average value: 0.219 %<br>Grade Count:20  |
| Molybdenum, Mo                            | 0.200 - 2.20 %  | 0.200 - 2.20 %  | Average value: 1.05 % Grade<br>Count:32   |
| Niobium, Nb (Columbium,<br>Cb)            | 0.500 - 2.00 %  | 0.500 - 2.00 %  | Average value: 1.61 % Grade<br>Count:9  |
| Nitrogen, N                               | 0.0100 - 0.0500 %                                     | 0.0100 - 0.0500 %                                       | Average value: 0.0295 %<br>Grade Count:19                                       |
| Oxygen, O                                 | 0.0750 - 0.200 %                                      | 0.0750 - 0.200 %  | Average value: 0.148 %<br>Grade Count:20  |
| Silicon, Si                               | 0.0150 - 0.600 %                                      | 0.0150 - 0.600 %  | Average value: 0.240 %<br>Grade Count:14  |
| Tantalum, Ta                              | 1.00 %  | 1.00 %  | Average value: 1.00 % Grade<br>Count:6  |
| Tin, Sn                                   | 0.600 - 11.0 %  | 0.600 - 11.0 %  | Average value: 3.55 % Grade<br>Count:17   |
| Titanium, Ti                              | 81.0 - 98.0 %   | 81.0 - 98.0 %   | Average value: 90.5 % Grade<br>Count:51   |
| Vanadium, V                               | 0.600 - 3.00 %  | 0.600 - 3.00 %  | Average value: 1.82 % Grade<br>Count:22   |
| Zirconium, Zr                             | 0.600 - 6.00 %  | 0.600 - 6.00 %  | Average value: 3.51 % Grade<br>Count:17   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TI-6AL-2SN-4ZR-2MO-0.1SI,  
DUPLEX ANNEALED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti-6242Si; Ti-6242S; UNS R54620

Components; Wt. %; Al; 6; Mo; 2; Si; 0.08; Sn; 2; Zr; 4; Ti; 86

Material Notes: Information provided by Allvac and the references.

Applications: High-temp jet engines. Blades, discs, spacers, seals. High performance automotive valves.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments   |
|----------------------------|--|---|--|
| Density                    | 4.54 g/cc                                  | 0.164 lb/in <sup>3</sup>                    |  |
| Hardness, Brinell          | 318  | 318   | Estimated from Rockwell C.   |
| Hardness, Knoop            | 346  | 346   | Estimated from Rockwell C.   |
| Hardness, Rockwell C       | 34.0                                       | 34.0  |  |
| Hardness, Vickers          | 333  | 333   | Estimated from Rockwell C.   |
| Tensile Strength, Ultimate | 1110 MPa                                   | 161000 psi                                  |  |
| Tensile Strength, Yield    | 1050 MPa                                   | 152000 psi                                  |  |
| Elongation at Break        | 13.0 %                                     | 13.0 %                                      |  |
| Reduction of Area          | 30.0 %                                     | 30.0 %                                      |  |
| Compressive Modulus        | 118 GPa                                    | 17100 ksi                                   |  |
| Notched Tensile Strength   | 1025 MPa                                   | 148700 psi                                  | K <sub>t</sub> >17; Average of longitudinal and transverse.                |
| Ultimate Bearing Strength  | 1800 MPa                                   | 261000 psi                                  | e/D = 2.0; varies with thickness; this value is at about 2.4 mm.           |
| Bearing Yield Strength     | 1450 MPa                                   | 210000 psi                                  | e/D = 2.0  |
| Poissons Ratio             | 0.325                                      | 0.325                                       |  |
| Charpy Impact              | 36.0 J                                     | 26.6 ft-lb                                  | V-Notch, oxygen content about 0.1%. Value drops with increasing O content. |
| Fatigue Strength           | 225 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 32600 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | K <sub>t</sub> = 3   |
|                            | 320 MPa<br># of Cycles 50000               | 46400 psi<br># of Cycles 50000              | K <sub>t</sub> = 3   |
|                            | 610 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 88500 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | A=0.67   |
|                            | 750 MPa<br># of Cycles 500000              | 109000 psi<br># of Cycles 500000            | A = 0.67   |
| Shear Modulus              | 44.5 GPa                                   | 6450 ksi                                    | Calculated   |
| Electrical Resistivity     | 0.000190 ohm-cm                            | 0.000190 ohm-cm                             |  |
| CTE, linear 20°C           | 7.70 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 100 °C | 4.28 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 212 °F |  |
|                            | 7.70 µm/m-°C<br>Temperature 205 °C         | 4.28 µin/in-°F<br>Temperature 401 °F        |  |
|                            | 8.10 µm/m-°C<br>Temperature 315 - 540 °C   | 4.50 µin/in-°F<br>Temperature 599 - 1000 °F | average  |
| Specific Heat Capacity     | 0.460 J/g-°C                               | 0.110 BTU/lb-°F                             |  |
| Thermal Conductivity       | 7.00 W/m-K                                 | 48.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          |  |
| Melting Point              | <= 1705 °C                                 | <= 3101 °F                                  | Liquidus   |
| Liquidus                   | 1705 °C                                    | 3101 °F                                     |  |
| Beta Transus               | 995 °C                                     | 1820 °F                                     |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM 11 (Ti-6Al-2Sn-1.5Zr-1Mo-0.35Bi-0.1Si) , AGED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti-6242Si; Ti-6242S; UNS R54620

Components; Wt. %; Al; 6; Bi; 0.35; Mo; 1; Si; 0.1; Sn; 2.5; Zr; 1.5; Ti; 89

Material Notes: Sample Annealed 705°C then aged 595°C. 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

Applications: High-temp jet engines. Blades, discs, spacers, seals. High performance automotive valves.

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                     | Comments                                      |
|----------------------------|---|---|---|
| Density                    | 4.50 g/cc                                 | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                    |   |
| Tensile Strength, Ultimate | 1040 MPa                                  | 151000 psi                                  |   |
| Tensile Strength, Yield    | 940 MPa                                   | 136000 psi                                  |   |
| Elongation at Break        | 19.0 %                                    | 19.0 %                                      |   |
| Reduction of Area          | 32.0 %                                    | 32.0 %                                      |   |
| Modulus of Elasticity      | 115 GPa                                   | 16700 ksi                                   | Typical value for an alpha titanium alloy     |
| Poissons Ratio             | 0.310                                     | 0.310                                       | Typical for alpha titanium alloy.             |
| Shear Modulus              | 43.9 GPa                                  | 6370 ksi                                    | Calculated from typical values.               |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                           | 0.000160 ohm-cm                             | Estimated from similar alpha titanium alloys. |
| CTE, linear 20°C           | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F | Typical alpha titanium alloy                  |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                              | 0.125 BTU/lb-°F                             | Typical value for titanium alloys.            |
| Thermal Conductivity       | 7.00 W/m-K                                | 48.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          | Estimated from similar titanium alloys.       |
| Beta Transus               | 1000 °C                                   | 1830 °F                                     |   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM 11 (TI-6AL-2SN-1.5ZR-1MO-0.35BI-0.1SI)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 6; Bi; 0.35; Mo; 1; Si; 0.1; Sn; 2.5; Zr; 1.5; Ti; 89

Material Notes: 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                     | Comments                                      |
|----------------------------|---|---|---|
| Density                    | 4.50 g/cc                                 | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                    |   |
| Tensile Strength, Ultimate | 1030 MPa                                  | 149000 psi                                  |   |
| Tensile Strength, Yield    | 930 MPa                                   | 135000 psi                                  |   |
| Elongation at Break        | 16.0 %                                    | 16.0 %                                      |   |
| Reduction of Area          | 34.0 %                                    | 34.0 %                                      |   |
| Modulus of Elasticity      | 115 GPa                                   | 16700 ksi                                   | Typical value for an alpha titanium alloy     |
| Poissons Ratio             | 0.310                                     | 0.310                                       | Typical for alpha titanium alloy.             |
| Shear Modulus              | 43.9 GPa                                  | 6370 ksi                                    | Calculated from typical values.               |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                           | 0.000160 ohm-cm                             | Estimated from similar alpha titanium alloys. |
| CTE, linear 20°C           | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F | Typical alpha titanium alloy                  |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                              | 0.125 BTU/lb-°F                             | Typical value for titanium alloys.            |
| Thermal Conductivity       | 7.00 W/m-K                                | 48.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          | Estimated from similar titanium alloys.       |
| Beta Transus               | 980 - 1015 °C                             | 1800 - 1859 °F                              |   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-6AL-2NB-1TA-  
0.8MO (TI-621/0.8), AS-ROLLED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti-621/0.8; UNS R56210; Ti-6211

Components; Wt. %; Al; 6; Nb; 2; Mo; 0.8; Ta; 1; Ti; 90

Material Notes: As-rolled from above Beta Transus. Alpha Alloy. 3 other heat treatments of this alloy are in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                     | English                            | Comments                               |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>           |  |
| Hardness, Brinell          | 290                        | 290                                | Estimated from Rockwell C.             |
| Hardness, Knoop            | 315                        | 315                                | Estimated from Rockwell C.             |
| Hardness, Rockwell C       | 30.0                       | 30.0                               |  |
| Hardness, Vickers          | 304                        | 304                                | Estimated from Rockwell C.             |
| Tensile Strength, Ultimate | 830 MPa                    | 120000 psi                         |  |
| Tensile Strength, Yield    | 760 MPa                    | 110000 psi                         |  |
| Elongation at Break        | 10.0 %                     | 10.0 %                             |  |
| Reduction of Area          | 28.0 %                     | 28.0 %                             | Average of Longitudinal and Transverse |
| Modulus of Elasticity      | 117 GPa                    | 17000 ksi                          | In Tension                             |
| Compressive Yield Strength | 820 MPa                    | 119000 psi                         |  |
| Compressive Modulus        | 126 GPa                    | 18300 ksi                          |  |
| Poissons Ratio             | 0.310                      | 0.310                              |  |
| Charpy Impact              | 37.0 J                     | 27.3 ft-lb                         | V-notch                                |
| Shear Modulus              | 44.7 GPa                   | 6480 ksi                           | Calculated                             |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm            | 0.000160 ohm-cm                    |  |
| CTE, linear 20°C           | 9.00 µm/m-°C               | 5.00 µin/in-°F                     | average                                |
|                            | Temperature 20.0 - 650 °C  | Temperature 68.0 - 1200 °F         |  |
|                            | 9.20 µm/m-°C               | 5.11 µin/in-°F                     | annealed                               |
|                            | Temperature 20.0 - 93.0 °C | Temperature 68.0 - 199 °F          |  |
| Specific Heat Capacity     | 0.552 J/g-°C               | 0.132 BTU/lb-°F                    |  |
| Thermal Conductivity       | 6.40 W/m-K                 | 44.4 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F |  |
| Melting Point              | <= 1650 °C                 | <= 3000 °F                         | Liquidus                               |
| Liquidus                   | 1650 °C                    | 3000 °F                            |  |
| Beta Transus               | 1110 °C                    | 2030 °F                            |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-6AL-2NB-1TA-  
0.8MO (TI-621/0.8), ALPHA-ANNEALED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti-621/0.8; UNS R56210; Ti-6211

Components; Wt. %; Al; 6; Nb; 2; Mo; 0.8; Ta; 1; Ti; 90

Material Notes: Alpha-annealed at 870°C. Alpha Alloy. 3 other heat treatments of this alloy are in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments   |
|----------------------------|--|--|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Brinell          | 290  | 290  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Knoop            | 315  | 315  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 30.0                                       | 30.0   |  |
| Hardness, Vickers          | 304  | 304  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Tensile Strength, Ultimate | 830 MPa                                    | 120000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 710 MPa                                    | 103000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 11.0 %                                     | 11.0 %                                       |  |
| Reduction of Area          | 30.0 %                                     | 30.0 %                                       | Average of Longitudinal and Transverse             |
| Modulus of Elasticity      | 115 GPa                                    | 16700 ksi                                    | Value for annealed sample in tension.              |
| Compressive Yield Strength | 790 MPa                                    | 115000 psi                                   |  |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310  |  |
| Charpy Impact              | 42.0 J                                     | 31.0 ft-lb                                   | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 170 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 24700 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 3.0 |
|                            | 280 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 40600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | Unnotched  |
| Fracture Toughness         | 99.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  | 90.1 ksi-in <sup>1/2</sup>                   | K <sub>IC</sub>                                    |
| Shear Modulus              | 43.9 GPa                                   | 6370 ksi                                     | Calculated   |
| Shear Strength             | 580 MPa                                    | 84100 psi                                    | Ultimate shear strength                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                            | 0.000160 ohm-cm                              |  |
| CTE, linear                | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 615 °C  | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1140 °F | average  |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 93.0 °C | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 199 °F  |  |
| Specific Heat Capacity     | 0.552 J/g-°C                               | 0.132 BTU/lb-°F                              |  |
| Thermal Conductivity       | 6.40 W/m-K                                 | 44.4 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |  |
| Melting Point              | <= 1650 °C                                 | <= 3000 °F                                   | Liquidus   |
| Liquidus                   | 1650 °C                                    | 3000 °F                                      |  |
| Beta Transus               | 1110 °C                                    | 2030 °F                                      |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-6AL-2NB-1TA-  
0.8MO (TI-621/0.8), STA-1

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti-621/0.8; UNS R56210; Ti-6211

Components; Wt. %; Al; 6; Nb; 2; Mo; 0.8; Ta; 1; Ti; 90

Material Notes: Beta Solution Treated 1035°C, Aged 595°C. Alpha Alloy. 3 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments                               |
|----------------------------|--|--|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Brinell          | 290  | 290  | Estimated from Rockwell C.             |
| Hardness, Knoop            | 315  | 315  | Estimated from Rockwell C.             |
| Hardness, Rockwell C       | 30.0                                       | 30.0   |  |
| Hardness, Vickers          | 304  | 304  | Estimated from Rockwell C.             |
| Tensile Strength, Ultimate | 930 MPa                                    | 135000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 800 MPa                                    | 116000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 10.0 %                                     | 10.0 %                                       |  |
| Reduction of Area          | 21.0 %                                     | 21.0 %                                       | Average of Longitudinal and Transverse |
| Modulus of Elasticity      | 115 GPa                                    | 16700 ksi                                    | Value for annealed sample in tension.  |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310  |  |
| Charpy Impact              | 32.0 J                                     | 23.6 ft-lb                                   | V-notch                                |
| Shear Modulus              | 43.9 GPa                                   | 6370 ksi                                     | Calculated                             |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                            | 0.000160 ohm-cm                              |  |
| CTE, linear                | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 650 °C  | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1200 °F | average                                |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 93.0 °C | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 199 °F  | annealed                               |
| Specific Heat Capacity     | 0.552 J/g-°C                               | 0.132 BTU/lb-°F                              |  |
| Thermal Conductivity       | 6.40 W/m-K                                 | 44.4 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |  |
| Melting Point              | <= 1650 °C                                 | <= 3000 °F                                   | Liquidus                               |
| Liquidus                   | 1650 °C                                    | 3000 °F                                      |  |
| Beta Transus               | 1110 °C                                    | 2030 °F                                      |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-6Al-2Nb-1Ta-  
0.8Mo (Ti-621/0.8), STA

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti-621/0.8; UNS R56210; Ti-6211

Components; Wt. %; Al; 6; Nb; 2; Mo; 0.8; Ta; 1; Ti; 90

Material Notes: Solution Treated 990°C, Aged 595°C. Alpha Alloy. 3 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments                               |
|----------------------------|--|--|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Rockwell C       | 30.0                                       | 30.0   |  |
| Tensile Strength, Ultimate | 900 MPa                                    | 131000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 790 MPa                                    | 115000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 11.0 %                                     | 11.0 %                                       |  |
| Reduction of Area          | 24.0 %                                     | 24.0 %                                       | Average of Longitudinal and Transverse |
| Modulus of Elasticity      | 115 GPa                                    | 16700 ksi                                    | Value for annealed sample in tension.  |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310  |  |
| Charpy Impact              | 37.0 J                                     | 27.3 ft-lb                                   | V-notch                                |
| Shear Modulus              | 43.9 GPa                                   | 6370 ksi                                     | Calculated                             |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                            | 0.000160 ohm-cm                              |  |
| CTE, linear                | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 650 °C | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 1200 °F | average                                |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 93.0 °C | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 199 °F  | annealed                               |
| Specific Heat Capacity     | 0.552 J/g-°C                               | 0.132 BTU/lb-°F                              |  |
| Thermal Conductivity       | 6.40 W/m-K                                 | 44.4 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |  |
| Melting Point              | <= 1650 °C                                 | <= 3000 °F                                   | Liquidus                               |
| Liquidus                   | 1650 °C                                    | 3000 °F                                      |  |
| Beta Transus               | 1110 °C                                    | 2030 °F                                      |  |



# ПРИЛОЖЕНИЕ 9 СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM IMI 230 (TI-2.5CU), AGED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Cu; 2.5; Ti; 97.5

Material Notes: These properties are for the aged metal (higher strength than annealed metal). 1 other heat treatment of this alloy is in MatWeb.

Applications: Excellent cold formability, 20-50% higher tensile properties than CP titanium grades. Primarily used in aircraft hydraulic systems.

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                      | Comments                           |
|----------------------------|---|--|------------------------------------|
| Density                    | 4.56 g/cc                                 | 0.165 lb/in <sup>3</sup>                     |                                    |
| Tensile Strength, Ultimate | 770 MPa                                   | 112000 psi                                   |                                    |
| Tensile Strength, Yield    | 585 MPa                                   | 84800 psi                                    |                                    |
| Elongation at Break        | 22.0 %                                    | 22.0 %                                       |                                    |
| Modulus of Elasticity      | 105 GPa                                   | 15200 ksi                                    | Value for unaged sample.           |
| Poissons Ratio             | 0.310                                     | 0.310  | Typical for alpha titanium alloy.  |
| Fatigue Strength           | 200 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 29000 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | K <sub>t</sub> = 3.3               |
|                            | 470 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 68200 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | unnotched                          |
| Shear Modulus              | 40.1 GPa                                  | 5820 ksi                                     | Calculated from typical values.    |
| Electrical Resistivity     | 0.0000650 ohm-cm                          | 0.0000650 ohm-cm                             |                                    |
| CTE, linear                | 9.02 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.01 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F  |                                    |
|                            | 9.10 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 300 °C | 5.06 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 572 °F  | average                            |
|                            | 9.46 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 600 °C | 5.26 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1110 °F | average                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                              | 0.125 BTU/lb-°F                              | Typical value for titanium alloys. |
| Thermal Conductivity       | 13.0 W/m-K                                | 90.2 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |                                    |
| Beta Transus               | 895 °C                                    | 1640 °F                                      |                                    |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 10

### СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM IMI 230 (TI-2.5CU)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Cu; 2.5; Ti; 97.5

Material Notes: Annealed; Aging increases Strength. 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                      | Comments                           |
|----------------------------|---|--|------------------------------------|
| Density                    | 4.56 g/cc                                 | 0.165 lb/in <sup>3</sup>                     |                                    |
| Tensile Strength, Ultimate | 620 MPa                                   | 89900 psi                                    |                                    |
| Tensile Strength, Yield    | 480 MPa                                   | 69600 psi                                    |                                    |
| Elongation at Break        | 24.0 %                                    | 24.0 %                                       |                                    |
| Modulus of Elasticity      | 105 GPa                                   | 15200 ksi                                    |                                    |
| Poissons Ratio             | 0.310                                     | 0.310  | Typical for alpha titanium alloy.  |
| Fatigue Strength           | 280 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 40600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             |                                    |
| Shear Modulus              | 40.1 GPa                                  | 5820 ksi                                     | Calculated from typical values.    |
| Electrical Resistivity     | 0.0000650 ohm-cm                          | 0.0000650 ohm-cm                             |                                    |
| CTE, linear 20°C           | 9.02 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.01 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F  |                                    |
|                            | 9.10 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 300 °C | 5.06 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 572 °F  | average                            |
|                            | 9.46 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 600 °C | 5.26 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1110 °F | average                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                              | 0.125 BTU/lb-°F                              | Typical value for titanium alloys. |
| Thermal Conductivity       | 13.0 W/m-K                                | 90.2 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |                                    |
| Beta Transus               | 895 °C                                    | 1640 °F                                      |                                    |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 11

## СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-3AL-2.5V, ALPHA ANNEALED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti3Al2.5V, UNS R56320; ASTM Grade 9; Half 6-4; Tubing Alloy Components; Wt. %; Al; 3; V; 2.5; Ti; 94.5

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. Alpha annealed. 3 other heat treatments of this alloy are in Matweb.

Applications: Excellent cold formability, 20-50% higher tensile properties than CP titanium grades. Primarily used in aircraft hydraulic systems.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments   |
|----------------------------|--|--|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Brinell          | 256  | 256  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Knoop            | 278  | 278  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 24.0                                       | 24.0   |  |
| Hardness, Vickers          | 280  | 280  |  |
| Tensile Strength, Ultimate | 620 MPa                                    | 89900 psi                                    |  |
| Tensile Strength, Yield    | 500 MPa                                    | 72500 psi                                    |  |
| Elongation at Break        | 15.0 %                                     | 15.0 %                                       |  |
| Modulus of Elasticity      | 100 GPa                                    | 14500 ksi                                    | In Tension   |
| Compressive Yield Strength | 690 MPa                                    | 100000 psi                                   |  |
| Notched Tensile Strength   | 790 MPa                                    | 115000 psi                                   | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 6.3 |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300  |  |
| Charpy Impact              | 86.0 J                                     | 63.4 ft-lb                                   | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 170 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 24700 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 1.8 |
|                            | 280 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 40600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | unnotched  |
|                            | 280 MPa<br># of Cycles 50000               | 40600 psi<br># of Cycles 50000               | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 1.8 |
|                            | 380 MPa<br># of Cycles 40000               | 55100 psi<br># of Cycles 40000               | unnotched  |
| Fracture Toughness         | 100 MPa-m <sup>1/2</sup>                   | 91.0 ksi-in <sup>1/2</sup>                   | kJ/m <sup>2</sup> for J(IC)                        |
| Shear Modulus              | 44.0 GPa                                   | 6380 ksi                                     |  |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                              |  |
| CTE, linear 20°C           | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F  |  |
|                            | 9.86 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 315 °C  | 5.48 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 599 °F  | 9.67 in range 20-205°C                             |
|                            | 9.97 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 540 °C  | 5.54 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1000 °F | average  |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                               | 0.125 BTU/lb-°F                              | Typical value for titanium alloys.                 |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           | Value at 315°C is 11.8 W/m-°C                      |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                   | Liquidus   |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                      |  |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                      |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-3Al-2.5V, ST  
925°C, AGED 480°C

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti3Al2.5V, ST 925°C, Aged 480°C; Ti-3-2.5 STA; UNS R56320; ASTM Grade 9; Half 6-4; Tubing Alloy

Components; Wt. %; Al; 3; V; 2.5; Ti; 94.5

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. Alpha annealed. 3 other heat treatments of this alloy are in Matweb.

Applications: Excellent cold formability, 20-50% higher tensile properties than CP titanium grades. Primarily used in aircraft hydraulic systems.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments                           |
|----------------------------|--|--|------------------------------------|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |                                    |
| Tensile Strength, Ultimate | 910 MPa                                    | 132000 psi                                   |                                    |
| Tensile Strength, Yield    | 830 MPa                                    | 120000 psi                                   |                                    |
| Elongation at Break        | 11.0 %                                     | 11.0 %                                       |                                    |
| Modulus of Elasticity      | 100 GPa                                    | 14500 ksi                                    | Alpha-annealed in tension.         |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300  | alpha annealed                     |
| Shear Modulus              | 44.0 GPa                                   | 6380 ksi                                     | Alpha-annealed                     |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                              |                                    |
| CTE, linear                | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F  |                                    |
|                            | 9.86 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 315 °C  | 5.48 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 599 °F  | 9.67 in range 20-205°C             |
|                            | 9.97 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 540 °C  | 5.54 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1000 °F | average                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                               | 0.125 BTU/lb-°F                              | Typical value for titanium alloys. |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           | Value at 315°C is 11.8 W/m-°C      |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                   | Liquidus                           |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                      |                                    |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                      |                                    |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 13 СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-3AL-2.5V, ALPHA- BETA ANNEAL, QUENCHED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti3Al2.5V, UNS R56320; ASTM Grade 9; Half 6-4; Tubing Alloy Components; Wt. %; Al; 3; V; 2.5; Ti; 94.5

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. Allpha annealed. 3 other heat treatments of this alloy are in Matweb.

Applications: Excellent cold formability, 20-50% higher tensile properties than CP titanium grades. Primarily used in aircraft hydraulic systems.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments                           |
|----------------------------|--|--|------------------------------------|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |                                    |
| Hardness, Vickers          | 300  | 300  |                                    |
| Tensile Strength, Ultimate | 620 MPa                                    | 89900 psi                                    |                                    |
| Tensile Strength, Yield    | 530 MPa                                    | 76900 psi                                    |                                    |
| Elongation at Break        | 20.0 %                                     | 20.0 %                                       |                                    |
| Modulus of Elasticity      | 100 GPa                                    | 14500 ksi                                    | Alpha-annealed in tension.         |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300  | alpha annealed                     |
| Charpy Impact              | 92.0 J                                     | 67.9 ft-lb                                   | V-notch                            |
| Fracture Toughness         | 93.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  | 84.6 ksi-in <sup>1/2</sup>                   | kJ/m <sup>2</sup> for J(IC)        |
| Shear Modulus              | 44.0 GPa                                   | 6380 ksi                                     | Alpha-annealed                     |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                              |                                    |
| CTE, linear                | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F  |                                    |
|                            | 9.86 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 315 °C  | 5.48 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 599 °F  | 9.67 in range 20-205°C             |
|                            | 9.97 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 540 °C  | 5.54 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1000 °F | average                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                               | 0.125 BTU/lb-°F                              | Typical value for titanium alloys. |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           | Value at 315°C is 11.8 W/m-°C      |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                   | Liquidus                           |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                      |                                    |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                      |                                    |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 14 СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-3Al-2.5V, BETA- ANNEAL 950°C

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti3Al2.5V, UNS R56320; ASTM Grade 9; Half 6-4; Tubing Alloy Components; Wt. %; Al; 3; V; 2.5; Ti; 94.5

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. Allpha annealed. 3 other heat treatments of this alloy are in Matweb.

Applications: Excellent cold formability, 20-50% higher tensile properties than CP titanium grades. Primarily used in aircraft hydraulic systems.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments                           |
|----------------------------|--|--|------------------------------------|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |                                    |
| Hardness, Vickers          | 300  | 300  |                                    |
| Tensile Strength, Ultimate | 620 MPa                                    | 89900 psi                                    |                                    |
| Tensile Strength, Yield    | 540 MPa                                    | 78300 psi                                    |                                    |
| Elongation at Break        | 17.0 %                                     | 17.0 %                                       |                                    |
| Modulus of Elasticity      | 100 GPa                                    | 14500 ksi                                    | Alpha-annealed in tension.         |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300  | alpha annealed                     |
| Charpy Impact              | 44.0 J                                     | 32.5 ft-lb                                   | V-notch                            |
| Fracture Toughness         | 70.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  | 63.7 ksi-in <sup>1/2</sup>                   | kJ/m <sup>2</sup> for J(IC)        |
| Shear Modulus              | 44.0 GPa                                   | 6380 ksi                                     | Alpha-annealed                     |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                              |                                    |
| CTE, linear                | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F  |                                    |
|                            | 9.86 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 315 °C  | 5.48 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 599 °F  | 9.67 in range 20-205°C             |
|                            | 9.97 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 540 °C  | 5.54 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1000 °F | average                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                               | 0.125 BTU/lb-°F                              | Typical value for titanium alloys. |
| Thermal Conductivity       | 11.8 W/m-K                                 | 81.9 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           | Value at 315°C is 11.8 W/m-°C      |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                   | Liquidus                           |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                      |                                    |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                      |                                    |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 15

### СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-5Al-2.5Sn

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: UNS R54520; Ti-5-2.5

Components; Wt. %; Al; 5; Fe; Max 0.5; O Max 0.2; Sn; 2.5; Ti; 92.5

Material Notes: 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments   |
|----------------------------|--|--|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Brinell          | 320  | 320  |  |
| Hardness, Knoop            | 363  | 363  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 36.0                                       | 36.0   |  |
| Hardness, Vickers          | 349  | 349  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Tensile Strength, Ultimate | 861 MPa                                    | 125000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 827 MPa                                    | 120000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 15.0 %                                     | 15.0 %                                       |  |
| Modulus of Elasticity      | 110 - 125 GPa                              | 16000 - 18100 ksi                            |  |
| Compressive Yield Strength | 830 MPa                                    | 120000 psi                                   |  |
| Notched Tensile Strength   | 1240 MPa                                   | 180000 psi                                   | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 6.5 |
| Ultimate Bearing Strength  | 1760 MPa                                   | 255000 psi                                   | e/D = 2  |
| Bearing Yield Strength     | 1340 MPa                                   | 194000 psi                                   | e/D = 2  |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310  | Typical for alpha titanium alloy.                  |
| Charpy Impact              | 24.0 J                                     | 17.7 ft-lb                                   | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 290 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 42100 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 2.4 |
|                            | 380 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 55100 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | unnotched  |
|                            | 390 MPa<br># of Cycles 100000              | 56600 psi<br># of Cycles 100000              | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 2.4 |
|                            | 440 MPa<br># of Cycles 1.00e+6             | 63800 psi<br># of Cycles 1.00e+6             | unnotched  |
|                            | 530 MPa<br># of Cycles 100000              | 76900 psi<br># of Cycles 100000              | Unnotched  |
| Fracture Toughness         | 33.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  | 30.0 ksi-in <sup>1/2</sup>                   | K(ISCC)  |
|                            | 96.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  | 87.4 ksi-in <sup>1/2</sup>                   | K(IC)  |
| Shear Modulus              | 48.0 GPa                                   | 6960 ksi                                     |  |
| Shear Strength             | 520 MPa                                    | 75400 psi                                    | Ultimate shear strength                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                            | 0.000160 ohm-cm                              |  |
| CTE, linear 20°C           | 9.40 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 100 °C | 5.22 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 212 °F  |  |
|                            | 9.50 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 315 °C | 5.28 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 599 °F  | average; unspecified heat treatment.               |
|                            | 9.70 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 650 °C | 5.39 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 1200 °F | average  |
| Specific Heat Capacity     | 0.530 J/g-°C                               | 0.127 BTU/lb-°F                              | 0.674 J/g-°C at 315°C                              |
| Thermal Conductivity       | 7.80 W/m-K                                 | 54.1 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           | 10.9 W/m-°C at 315°C                               |
| Melting Point              | <= 1590 °C                                 | <= 2890 °F                                   | Liquidus   |
| Liquidus                   | 1590 °C                                    | 2890 °F                                      |  |
| Beta Transus               | 1040 - 1090 °C                             | 1900 - 1990 °F                               |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 16  
СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-5Al-2.5Sn, ELI,  
ANNEALED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: UNS R54521 (ELI); Ti-5-2.5

Components; Wt. %; Al; 5; Fe; Max 0.25; O Max 0.12; Sn; 2.5; Ti; 92.5

Material Notes: Annealed 700-870°C for 15 min-4 hr. 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments   |
|----------------------------|--|---|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                    |  |
| Hardness, Brinell          | 311  | 311   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Knoop            | 337  | 337   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 33.0                                       | 33.0  |  |
| Hardness, Vickers          | 325  | 325   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Tensile Strength, Ultimate | 775 MPa                                    | 112000 psi                                  |  |
| Tensile Strength, Yield    | 720 MPa                                    | 104000 psi                                  |  |
| Elongation at Break        | 15.0 %                                     | 15.0 %                                      |  |
| Modulus of Elasticity      | 110 GPa                                    | 16000 ksi                                   | in tension.  |
| Notched Tensile Strength   | 1080 MPa                                   | 157000 psi                                  | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 6.3 |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310                                       | Typical for alpha titanium alloy.                  |
| Charpy Impact              | 44.0 J                                     | 32.5 ft-lb                                  | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 410 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 59500 psi<br># of Cycles 1.00e+7            |  |
| Fracture Toughness         | 88.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  | 80.1 ksi-in <sup>1/2</sup>                  | K <sub>IC</sub>                                    |
| Shear Modulus              | 48.0 GPa                                   | 6960 ksi                                    | Standard Ti-5-2.5                                  |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                            | 0.000160 ohm-cm                             |  |
| CTE, linear                | 9.40 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 100 °C | 5.22 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 212 °F |  |
|                            | 9.50 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 315 °C | 5.28 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 599 °F | average  |
| Specific Heat Capacity     | 0.530 J/g-°C                               | 0.127 BTU/lb-°F                             | 0.674 J/g-°C at 315°C                              |
| Thermal Conductivity       | 7.80 W/m-K                                 | 54.1 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          |  |
| Melting Point              | <= 1590 °C                                 | <= 2890 °F                                  | Liquidus   |
| Liquidus                   | 1590 °C                                    | 2890 °F                                     |  |
| Beta Transus               | 1040 - 1090 °C                             | 1900 - 1990 °F                              |  |



ПРИЛОЖЕНИЕ 17

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-5Al-2Zr-2Mo-  
0.25Si

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti5Al2Zr2Mo0.25Si

Components; Wt. %; Al; 5; Mo; 2; Si; 0.25; Zr; 2; Ti; 91

Material Notes: Solution Treated 975°C, Aged 595°C, 2h. Alpha Alloy

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                      | Comments                                   |
|----------------------------|---|--|--|
| Density                    | 4.51 g/cc                                 | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Tensile Strength, Ultimate | 970 MPa                                   | 141000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 900 MPa                                   | 131000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 13.0 %                                    | 13.0 %                                       |  |
| Modulus of Elasticity      | 113.8 GPa                                 | 16510 ksi                                    |  |
| Poissons Ratio             | 0.326                                     | 0.326  |  |
| Shear Modulus              | 42.9 GPa                                  | 6220 ksi                                     | Calculated                                 |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                           | 0.000160 ohm-cm                              | Estimated from similar materials           |
| CTE, linear 20°C           | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F  | Typical alpha titanium alloy               |
|                            | 10.3 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 815 °C | 5.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1500 °F | average                                    |
| Specific Heat Capacity     | 0.500 J/g-°C                              | 0.120 BTU/lb-°F                              | Estimated from similar materials           |
| Thermal Conductivity       | 7.00 W/m-K                                | 48.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           | Estimated from similar materials           |
| Melting Point              | <= 1670 °C                                | <= 3040 °F                                   | Liquidus; Estimated from similar materials |
| Liquidus                   | 1670 °C                                   | 3040 °F                                      | Estimated from similar materials           |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 18

### СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti6Al2Nb1Ta1Mo, Ti-6211; Ti-621/0.8; UNS R56210

Components; Wt. %; Al; 6; Nb; 2; Mo; 1; Ta; 1; Ti; 90

Material Notes: 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                      | Comments                                   |
|----------------------------|--|--|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Brinell          | 290  | 290  | Estimated from Rockwell C.                 |
| Hardness, Knoop            | 315  | 315  | Estimated from Rockwell C.                 |
| Hardness, Rockwell C       | 30.0                                       | 30.0   |  |
| Hardness, Vickers          | 304  | 304  | Estimated from Rockwell C.                 |
| Tensile Strength, Ultimate | 830 MPa                                    | 120000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 730 MPa                                    | 106000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 13.0 %                                     | 13.0 %                                       |  |
| Modulus of Elasticity      | 113.8 GPa                                  | 16510 ksi                                    |  |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310  | Typical for alpha titanium alloy.          |
| Charpy Impact              | 31.0 J                                     | 22.9 ft-lb                                   | V-notch                                    |
| Shear Modulus              | 43.4 GPa                                   | 6290 ksi                                     | Calculated from typical values.            |
| Electrical Resistivity     | 0.000154 ohm-cm                            | 0.000154 ohm-cm                              | Annealed                                   |
| CTE, linear 20°C           | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 615 °C  | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1140 °F | average                                    |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 93.0 °C | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 199 °F  | annealed                                   |
| Specific Heat Capacity     | 0.550 J/g-°C                               | 0.131 BTU/lb-°F                              | Estimated from similar materials           |
| Thermal Conductivity       | 6.40 W/m-K                                 | 44.4 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |  |
| Melting Point              | <= 1650 °C                                 | <= 3000 °F                                   | Liquidus; Estimated from similar materials |
| Liquidus                   | 1650 °C                                    | 3000 °F                                      | Estimated from similar materials           |
| Beta Transus               | 1016 °C                                    | 1861 °F                                      |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo, ANNEALED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti6Al2Nb1Ta1Mo, Ti-6211; Ti-621/0.8; UNS R56210

Components; Wt. %; Al; 6; Nb; 2; Mo; 1; Ta; 1; Ti; 90

Material Notes: Annealed 700-870°C for 15 - 120 min. 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments   |
|----------------------------|--|---|--|
| Density                    | 4.48 g/cc                                  | 0.162 lb/in <sup>3</sup>                    |  |
| Hardness, Brinell          | 290  | 290   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Knoop            | 315  | 315   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 30.0                                       | 30.0  |  |
| Hardness, Vickers          | 304  | 304   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Tensile Strength, Ultimate | 860 MPa                                    | 125000 psi                                  |  |
| Tensile Strength, Yield    | 760 MPa                                    | 110000 psi                                  |  |
| Elongation at Break        | 14.0 %                                     | 14.0 %                                      |  |
| Modulus of Elasticity      | 115.8 GPa                                  | 16800 ksi                                   | in tension.  |
| Compressive Yield Strength | 790 MPa                                    | 115000 psi                                  |  |
| Notched Tensile Strength   | 1210 MPa                                   | 175000 psi                                  | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 5.8 |
| Poissons Ratio             | 0.310                                      | 0.310                                       | Typical for alpha titanium alloy.                  |
| Charpy Impact              | 54.0 J                                     | 39.8 ft-lb                                  | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 170 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 24700 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 3.0 |
|                            | 280 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 40600 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | unnotched  |
| Fracture Toughness         | 100 MPa-m <sup>1/2</sup>                   | 91.0 ksi-in <sup>1/2</sup>                  | K <sub>IC</sub>                                    |
| Shear Modulus              | 44.2 GPa                                   | 6410 ksi                                    | Calculated from typical values.                    |
| Shear Strength             | 580 MPa                                    | 84100 psi                                   | Ultimate shear strength                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000154 ohm-cm                            | 0.000154 ohm-cm                             |  |
| CTE, linear                | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 93.0 °C | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 199 °F |  |
| Specific Heat Capacity     | 0.550 J/g-°C                               | 0.131 BTU/lb-°F                             | Estimated from similar materials                   |
| Thermal Conductivity       | 6.40 W/m-K                                 | 44.4 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          |  |
| Melting Point              | <= 1650 °C                                 | <= 3000 °F                                  | Liquidus; Estimated from similar materials         |
| Liquidus                   | 1650 °C                                    | 3000 °F                                     | Estimated from similar materials                   |
| Beta Transus               | 1016 °C                                    | 1861 °F                                     |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 20

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-6AL-2SN-4ZR-2MO  
(TI-6-2-4-2), SHEET

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti6Al2Sn4Zr2Mo, Ti-6242; Ti-6-2-4-2; UNS R54620

Components; Wt. %; Al; 6; Mo; 2; Sn; 2; Zr; 4; Ti; 86

Material Notes: Unspecified heat treatment. Alpha Alloy. Silicon is often added to improve creep resistance (See Ti-6242S). 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

Applications: High-temp jet engines. Blades, discs, spacers, seals. High performance automotive valves.

| Physical Properties        | Metric                    | English                            | Comments                                   |
|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|
| Density                    | 4.54 g/cc                 | 0.164 lb/in <sup>3</sup>           |  |
| Hardness, Brinell          | 318                       | 318                                | Estimated from Rockwell C.                 |
| Hardness, Knoop            | 346                       | 346                                | Estimated from Rockwell C.                 |
| Hardness, Rockwell C       | 34.0                      | 34.0                               | Estimated from similar materials           |
| Hardness, Vickers          | 333                       | 333                                | Estimated from Rockwell C.                 |
| Tensile Strength, Ultimate | 1010 MPa                  | 146000 psi                         |  |
| Tensile Strength, Yield    | 990 MPa                   | 144000 psi                         |  |
| Elongation at Break        | 3.00 %                    | 3.00 %                             |  |
| Modulus of Elasticity      | 120 GPa                   | 17400 ksi                          | In Tension                                 |
| Compressive Yield Strength | 1080 MPa                  | 157000 psi                         | 0.2 % Permanent Set                        |
| Compressive Modulus        | 130 GPa                   | 18900 ksi                          |  |
| Poissons Ratio             | 0.320                     | 0.320                              | duplex annealed                            |
| Fracture Toughness         | 148 MPa-m <sup>1/2</sup>  | 135 ksi-in <sup>1/2</sup>          | Plane-Strain                               |
| Shear Modulus              | 45.5 GPa                  | 6600 ksi                           | Calculated                                 |
| Shear Strength             | 690 MPa                   | 100000 psi                         | Ultimate shear strength                    |
| Electrical Resistivity     | 0.000190 ohm-cm           | 0.000190 ohm-cm                    |  |
| CTE, linear 20°C           | 7.70 µm/m-°C              | 4.28 µin/in-°F                     |  |
|                            | Temperature 20.0 - 100 °C | Temperature 68.0 - 212 °F          |  |
|                            | 8.10 µm/m-°C              | 4.50 µin/in-°F                     | average                                    |
|                            | Temperature 20.0 - 315 °C | Temperature 68.0 - 599 °F          |  |
|                            | 8.10 µm/m-°C              | 4.50 µin/in-°F                     | average                                    |
|                            | Temperature 20.0 - 540 °C | Temperature 68.0 - 1000 °F         |  |
| Specific Heat Capacity     | 0.460 J/g-°C              | 0.110 BTU/lb-°F                    |  |
| Thermal Conductivity       | 7.10 W/m-K                | 49.3 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F |  |
| Melting Point              | <= 1700 °C                | <= 3090 °F                         | Liquidus; Estimated from similar materials |
| Liquidus                   | 1700 °C                   | 3090 °F                            | Estimated from similar materials           |
| Beta Transus               | 990 °C                    | 1810 °F                            |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo  
(Ti-6-2-4-2), DUPLEX ANNEALED**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti6Al2Sn4Zr2Mo, Ti-6242; Ti-6-2-4-2; UNS R54620

Components; Wt. %; Al; 6; Mo; 2; Sn; 2; Zr; 4; Ti; 86

Material Notes: Alpha Alloy. Silicon is often added to improve creep resistance (See Ti-6242S). 1 other heat treatment of this alloy is in Matweb.

Applications: High-temp jet engines. Blades, discs, spacers, seals. High performance automotive valves.

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                      | Comments   |
|----------------------------|---|--|--|
| Density                    | 4.54 g/cc                                 | 0.164 lb/in <sup>3</sup>                     |  |
| Hardness, Brinell          | 304                                       | 304  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Knoop            | 330                                       | 330  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 32.0                                      | 32.0   |  |
| Hardness, Vickers          | 318                                       | 318  | Estimated from Rockwell C.                         |
| Tensile Strength, Ultimate | 940 MPa                                   | 136000 psi                                   |  |
| Tensile Strength, Yield    | 860 MPa                                   | 125000 psi                                   |  |
| Elongation at Break        | 15.0 %                                    | 15.0 %                                       |  |
| Modulus of Elasticity      | 113.8 GPa                                 | 16510 ksi                                    |  |
| Compressive Yield Strength | 1070 MPa                                  | 155000 psi                                   |  |
| Notched Tensile Strength   | 1170 MPa                                  | 170000 psi                                   | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 3.0 |
| Ultimate Bearing Strength  | 2000 MPa                                  | 290000 psi                                   | e/D = 2  |
| Bearing Yield Strength     | 1620 MPa                                  | 235000 psi                                   | e/D = 2  |
| Poissons Ratio             | 0.320                                     | 0.320  |  |
| Charpy Impact              | 20.0 J                                    | 14.8 ft-lb                                   | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 280 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 40600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 3.0 |
|                            | 480 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 69600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | unnotched  |
| Shear Modulus              | 43.1 GPa                                  | 6250 ksi                                     | Calculated   |
| Shear Strength             | 660 MPa                                   | 95700 psi                                    | Ultimate shear strength                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000190 ohm-cm                           | 0.000190 ohm-cm                              |  |
| CTE, linear                | 7.70 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 4.28 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F  |  |
|                            | 8.10 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 315 °C | 4.50 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 599 °F  | average  |
|                            | 8.10 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 540 °C | 4.50 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1000 °F | average  |
| Specific Heat Capacity     | 0.460 J/g-°C                              | 0.110 BTU/lb-°F                              |  |
| Thermal Conductivity       | 7.10 W/m-K                                | 49.3 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |  |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                | <= 3090 °F                                   | Liquidus; Estimated from similar materials         |
| Liquidus                   | 1700 °C                                   | 3090 °F                                      | Estimated from similar materials                   |
| Beta Transus               | 990 °C                                    | 1810 °F                                      |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 22

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM IMI 679 (Ti-11Sn-5Zr-2.25Al-1Mo-0.25Si), OIL-QUENCHED AND AGED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti11Sn5Zr2.25Al1Mo0.25Si

Components; Wt. %; Al; 2.25; Mo; 1; Si; 0.25; Sn; 11; Zr; 5; V; Ti; 81

Material Notes: Alpha Prime Transus 880°C. Tensile Properties below after oil quench/aged heat treatment: 900°C/OQ, 500°C/24hr/AC.

| Physical Properties              | Metric                              | English                               | Comments  |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Density                          | 4.84 g/cc                           | 0.175 lb/in <sup>3</sup>              |   |
| Tensile Strength, Ultimate       | 1110 MPa                            | 161000 psi                            |   |
| Tensile Strength, Yield          | 970 MPa                             | 141000 psi                            |   |
| Elongation at Break              | 8.00 %                              | 8.00 %                                |   |
| Reduction of Area                | 25.0 %                              | 25.0 %                                |   |
| Modulus of Elasticity            | 115 GPa                             | 16700 ksi                             | Typical value for an alpha titanium alloy                   |
| Poissons Ratio                   | 0.310                               | 0.310                                 | Typical for alpha titanium alloy.                           |
| Fatigue Strength                 | 110 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 16000 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | K <sub>t</sub> = 3.0; R = -1.0 (air-cooled and aged sample) |
|                                  | 200 MPa<br># of Cycles 50000        | 29000 psi<br># of Cycles 50000        | K <sub>t</sub> = 3.0; R = -1.0 (air-cooled and aged sample) |
|                                  | 390 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 56600 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | (air-cooled and aged sample)                                |
|                                  | 590 MPa<br># of Cycles 50000        | 85600 psi<br># of Cycles 50000        | (air-cooled and aged sample)                                |
| Shear Modulus                    | 43.9 GPa                            | 6370 ksi                              | Calculated from typical values.                             |
| Electrical Resistivity           | 0.000160 ohm-cm                     | 0.000160 ohm-cm                       |   |
| CTE, linear 20°C                 | 8.60 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.78 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |   |
|                                  | 9.30 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.17 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |   |
|                                  | 10.0 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.56 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |   |
| Specific Heat Capacity           | 0.500 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |   |
| Thermal Conductivity             | 8.30 W/m-K                          | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |   |
| Maximum Service Temperature, Air | 450 °C                              | 842 °F                                |   |
| Beta Transus                     | 880 °C                              | 1620 °F                               |   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 23

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM IMI 679 (Ti-11Sn-5Zr-  
2.25Al-1Mo-0.25Si), OIL-QUENCHED AND AGED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti11Sn5Zr2.25Al1Mo0.25Si

Components; Wt. %; Al; 2.25; Mo; 1; Si; 0.25; Sn; 11; Zr; 5; V; Ti; 81

Material Notes: Alpha Prime Transus 880°C. Heat treatment: 900°C/AC, 500°C/24hr/AC.

| Physical Properties              | Metric                              | English                               | Comments  |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Density                          | 4.84 g/cc                           | 0.175 lb/in <sup>3</sup>              |   |
| Tensile Strength, Ultimate       | 1030 MPa                            | 149000 psi                            |   |
| Tensile Strength, Yield          | 880 MPa                             | 128000 psi                            |   |
| Elongation at Break              | 8.00 %                              | 8.00 %                                |   |
| Reduction of Area                | 30.0 %                              | 30.0 %                                |   |
| Modulus of Elasticity            | 115 GPa                             | 16700 ksi                             | Typical value for an alpha titanium alloy                   |
| Poissons Ratio                   | 0.310                               | 0.310                                 | Typical for alpha titanium alloy.                           |
| Fatigue Strength                 | 110 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 16000 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | K <sub>t</sub> = 3.0; R = -1.0 (air-cooled and aged sample) |
|                                  | 200 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 29000 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | K <sub>t</sub> = 3.0; R = -1.0 (air-cooled and aged sample) |
|                                  | 390 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 56600 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | (air-cooled and aged sample), Unnotched                     |
|                                  | 590 MPa<br># of Cycles 50000        | 85600 psi<br># of Cycles 50000        | (air-cooled and aged sample) unnotched                      |
| Shear Modulus                    | 43.9 GPa                            | 6370 ksi                              | Calculated from typical values.                             |
| Electrical Resistivity           | 0.000160 ohm-cm                     | 0.000160 ohm-cm                       |   |
| CTE, linear                      | 8.60 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.78 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |   |
|                                  | 9.30 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.17 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |   |
|                                  | 10.0 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.56 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |   |
| Specific Heat Capacity           | 0.500 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |   |
| Thermal Conductivity             | 8.30 W/m-K                          | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |   |
| Maximum Service Temperature, Air | 450 °C                              | 842 °F                                |   |
| Beta Transus                     | 880 °C                              | 1620 °F                               |   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 24

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-8AL-1MO-1V (TI-8-1-1), BETA ANNEALED, AGED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti8Al1Mo1V, UNS R54810; Ti-811

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. Annealed at 1065°C, Aged at 595°C. 5 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance.

| Physical Properties        | Metric                              | English                               | Comments                   |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Density                    | 4.37 g/cc                           | 0.158 lb/in <sup>3</sup>              |                            |
| Tensile Strength, Ultimate | 1020 MPa                            | 148000 psi                            |                            |
| Tensile Strength, Yield    | 900 MPa                             | 131000 psi                            |                            |
| Elongation at Break        | 13.0 %                              | 13.0 %                                |                            |
| Modulus of Elasticity      | 120 GPa                             | 17400 ksi                             | unspecified heat treatment |
| Poissons Ratio             | 0.320                               | 0.320                                 | duplex annealed            |
| Shear Modulus              | 46.0 GPa                            | 6670 ksi                              |                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000197 ohm-cm                     | 0.000197 ohm-cm                       |                            |
| CTE, linear                | 8.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |                            |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |                            |
|                            | 10.1 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.61 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.502 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |                            |
| Thermal Conductivity       | 6.00 W/m-K                          | 41.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |                            |
| Melting Point              | <= 1540 °C                          | <= 2800 °F                            | Liquidus                   |
| Liquidus                   | 1540 °C                             | 2800 °F                               |                            |
| Beta Transus               | 1040 °C                             | 1900 °F                               |                            |



ПРИЛОЖЕНИЕ 25

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-8AL-1MO-1V (TI-8-1-1), ST 980°C (1800°F), AGED 595°C

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti8Al1Mo1V, UNS R54810; Ti-811

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. 5 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance.

| Physical Properties        | Metric                              | English                               | Comments                   |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Density                    | 4.37 g/cc                           | 0.158 lb/in <sup>3</sup>              |                            |
| Tensile Strength, Ultimate | 1180 MPa                            | 171000 psi                            |                            |
| Tensile Strength, Yield    | 1070 MPa                            | 155000 psi                            |                            |
| Elongation at Break        | 17.0 %                              | 17.0 %                                |                            |
| Reduction of Area          | 26.0 %                              | 26.0 %                                |                            |
| Modulus of Elasticity      | 120 GPa                             | 17400 ksi                             | unspecified heat treatment |
| Poissons Ratio             | 0.320                               | 0.320                                 | duplex annealed            |
| Shear Modulus              | 46.0 GPa                            | 6670 ksi                              |                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000197 ohm-cm                     | 0.000197 ohm-cm                       |                            |
| CTE, linear                | 8.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |                            |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |                            |
|                            | 10.1 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.61 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.502 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |                            |
| Thermal Conductivity       | 6.00 W/m-K                          | 41.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |                            |
| Melting Point              | <= 1540 °C                          | <= 2800 °F                            | Liquidus                   |
| Liquidus                   | 1540 °C                             | 2800 °F                               |                            |
| Beta Transus               | 1040 °C                             | 1900 °F                               |                            |

ПРИЛОЖЕНИЕ 26

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-8AL-1MO-1V (TI-8-1-1), BETA SOLUTION TREATED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti8Al1Mo1V, UNS R54810; Ti-811

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. ST 1065°C then quenched. 5 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance.

| Physical Properties     | Metric                              | English                               | Comments                   |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Density                 | 4.37 g/cc                           | 0.158 lb/in <sup>3</sup>              |                            |
| Tensile Strength, Yield | 870 MPa                             | 126000 psi                            |                            |
| Modulus of Elasticity   | 120 GPa                             | 17400 ksi                             | unspecified heat treatment |
| Poissons Ratio          | 0.320                               | 0.320                                 | duplex annealed            |
| Fracture Toughness      | >= 110 MPa-m <sup>1/2</sup>         | >= 100 ksi-in <sup>1/2</sup>          | K(IC)                      |
| Shear Modulus           | 46.0 GPa                            | 6670 ksi                              |                            |
| Electrical Resistivity  | 0.000197 ohm-cm                     | 0.000197 ohm-cm                       |                            |
| CTE, linear             | 8.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |                            |
|                         | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |                            |
|                         | 10.1 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.61 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |                            |
| Specific Heat Capacity  | 0.502 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |                            |
| Thermal Conductivity    | 6.00 W/m-K                          | 41.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |                            |
| Melting Point           | <= 1540 °C                          | <= 2800 °F                            | Liquidus                   |
| Liquidus                | 1540 °C                             | 2800 °F                               |                            |
| Beta Transus            | 1040 °C                             | 1900 °F                               |                            |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 27

### СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-8-1-1)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti8Al1Mo1V, UNS R54810; Ti-811

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. 5 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance.

| Physical Properties        | Metric                              | English                               | Comments                   |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Density                    | 4.37 g/cc                           | 0.158 lb/in <sup>3</sup>              |                            |
| Hardness, Brinell          | 334                                 | 334                                   | Estimated from Rockwell C. |
| Hardness, Knoop            | 363                                 | 363                                   | Estimated from Rockwell C. |
| Hardness, Rockwell C       | 36.0                                | 36.0                                  |                            |
| Hardness, Vickers          | 349                                 | 349                                   | Estimated from Rockwell C. |
| Tensile Strength, Ultimate | 937 MPa                             | 136000 psi                            |                            |
| Tensile Strength, Yield    | 910 MPa                             | 132000 psi                            |                            |
| Elongation at Break        | 18.0 %                              | 18.0 %                                |                            |
| Reduction of Area          | 47.0 %                              | 47.0 %                                |                            |
| Modulus of Elasticity      | 120 GPa                             | 17400 ksi                             |                            |
| Poissons Ratio             | 0.320                               | 0.320                                 | duplex annealed            |
| Fatigue Strength           | 689 MPa<br># of Cycles 50000        | 99900 psi<br># of Cycles 50000        |                            |
| Fracture Toughness         | 82.0 MPa-m <sup>1/2</sup>           | 74.6 ksi-in <sup>1/2</sup>            | K(IC)                      |
|                            | 151 MPa-m <sup>1/2</sup>            | 137 ksi-in <sup>1/2</sup>             | K(C)                       |
| Shear Modulus              | 46.0 GPa                            | 6670 ksi                              |                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000197 ohm-cm                     | 0.000197 ohm-cm                       |                            |
| CTE, linear 20°C           | 8.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |                            |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |                            |
|                            | 10.1 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.61 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.502 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |                            |
| Thermal Conductivity       | 6.00 W/m-K                          | 41.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |                            |
| Melting Point              | <= 1540 °C                          | <= 2800 °F                            | Liquidus                   |
| Liquidus                   | 1540 °C                             | 2800 °F                               |                            |
| Beta Transus               | 1040 °C                             | 1900 °F                               |                            |

ПРИЛОЖЕНИЕ 28

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-8AL-1MO-1V (TI-8-1-1) DUPLEX ANNEAL

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti8Al1Mo1V, DA, UNS R54810; Ti-811

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. Duplex Anneal: 980°C 4h; air cool; 540°C 24 h; air cool. 5 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance.

| Physical Properties        | Metric                              | English                               | Comments                   |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Density                    | 4.37 g/cc                           | 0.158 lb/in <sup>3</sup>              |                            |
| Hardness, Brinell          | 326                                 | 326                                   | Estimated from Rockwell C. |
| Hardness, Knoop            | 354                                 | 354                                   | Estimated from Rockwell C. |
| Hardness, Rockwell C       | 35.0                                | 35.0                                  |                            |
| Hardness, Vickers          | 341                                 | 341                                   | Estimated from Rockwell C. |
| Tensile Strength, Ultimate | 900 - 1000 MPa                      | 131000 - 145000 psi                   |                            |
| Tensile Strength, Yield    | 830 - 951 MPa                       | 120000 - 138000 psi                   |                            |
| Modulus of Elasticity      | 124 GPa                             | 18000 ksi                             |                            |
| Poissons Ratio             | 0.320                               | 0.320                                 |                            |
| Charpy Impact              | 20.0 - 34.0 J                       | 14.8 - 25.1 ft-lb                     | V-notch                    |
| Fatigue Strength           | 620 MPa<br># of Cycles 3.00e+6      | 89900 psi<br># of Cycles 3.00e+6      | unnotched                  |
|                            | 724 MPa<br># of Cycles 85000        | 105000 psi<br># of Cycles 85000       |                            |
| Fracture Toughness         | 176 MPa-m <sup>1/2</sup>            | 160 ksi-in <sup>1/2</sup>             | K(IC)                      |
|                            | 374 MPa-m <sup>1/2</sup>            | 340 ksi-in <sup>1/2</sup>             | K(C)                       |
| Shear Modulus              | 46.0 GPa                            | 6670 ksi                              |                            |
| Electrical Resistivity     | 0.000198 ohm-cm                     | 0.000198 ohm-cm                       |                            |
| CTE, linear                | 8.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F |                            |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |                            |
|                            | 10.1 µm/m-°C<br>Temperature 500 °C  | 5.61 µin/in-°F<br>Temperature 932 °F  |                            |
| Specific Heat Capacity     | 0.502 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |                            |
| Thermal Conductivity       | 6.00 W/m-K                          | 41.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |                            |
| Melting Point              | <= 1540 °C                          | <= 2800 °F                            | Liquidus                   |
| Liquidus                   | 1540 °C                             | 2800 °F                               |                            |
| Beta Transus               | 1038 °C                             | 1900 °F                               |                            |

ПРИЛОЖЕНИЕ 29

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TI-8AL-1MO-1V (TI-8-1-1) ANNEALED 8 HR AT 790°C (1450°F)**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Ti8Al1Mo1V, UNS R54810; Ti-811

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Information provided by Allvac and the references. 5 other heat treatments of this alloy are in MatWeb.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance.

| Physical Properties        | Metric                              | English                               | Comments   |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Density                    | 4.37 g/cc                           | 0.158 lb/in <sup>3</sup>              |  |
| Hardness, Brinell          | 334                                 | 334                                   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Knoop            | 363                                 | 363                                   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Hardness, Rockwell C       | 36.0                                | 36.0                                  |  |
| Hardness, Vickers          | 349                                 | 349                                   | Estimated from Rockwell C.                         |
| Tensile Strength, Ultimate | 1000 MPa                            | 145000 psi                            |  |
| Tensile Strength, Yield    | 930 MPa                             | 135000 psi                            |  |
| Elongation at Break        | 12.0 %                              | 12.0 %                                |  |
| Modulus of Elasticity      | 121 GPa                             | 17500 ksi                             | in tension.  |
| Compressive Yield Strength | 980 MPa                             | 142000 psi                            |  |
| Notched Tensile Strength   | 1100 MPa                            | 160000 psi                            | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 6.0 |
| Ultimate Bearing Strength  | 2000 MPa                            | 290000 psi                            | e/D = 2  |
| Bearing Yield Strength     | 1480 MPa                            | 215000 psi                            | e/D = 2  |
| Poissons Ratio             | 0.320                               | 0.320                                 |  |
| Charpy Impact              | 20.0 - 30.0 J                       | 14.8 - 22.1 ft-lb                     | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 170 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 24700 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | K <sub>t</sub> (stress concentration factor) = 2.6 |
|                            | 340 MPa<br># of Cycles 1.00e+7      | 49300 psi<br># of Cycles 1.00e+7      | unnotched  |
|                            | 725 MPa<br># of Cycles 50000        | 105000 psi<br># of Cycles 50000       | unnotched  |
| Shear Modulus              | 46.0 GPa                            | 6670 ksi                              |  |
| Shear Strength             | 620 MPa                             | 89900 psi                             | Ultimate shear strength                            |
| CTE, linear                | 8.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 °C | 4.72 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 °F | Annealed   |
|                            | 9.20 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.11 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F  |  |
| Specific Heat Capacity     | 0.502 J/g-°C                        | 0.120 BTU/lb-°F                       |  |
| Thermal Conductivity       | 6.00 W/m-K                          | 41.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F    |  |
| Melting Point              | <= 1540 °C                          | <= 2800 °F                            | Liquidus   |
| Liquidus                   | 1540 °C                             | 2800 °F                               |  |
| Beta Transus               | 1038 °C                             | 1900 °F                               |  |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 30

### СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM IMI 834

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 5.8; Nb; 0.7; Mo; 0.5; Si; 0.35; Sn; 4; Zr; 3.5; Ti; 85

Material Notes: Heat Treatment: 1015°C 2 hr; oil quench; 700°C 2 hr; air cool.

| Physical Properties        | Metric                                      | English                                       | Comments   |
|----------------------------|---|---|--|
| Density                    | 4.55 g/cc                                   | 0.164 lb/in <sup>3</sup>                      |  |
| Hardness, Brinell          | 326   | 326   | Estimated from Rockwell C.                           |
| Hardness, Knoop            | 354   | 354   | Estimated from Rockwell C.                           |
| Hardness, Rockwell C       | 35.0  | 35.0  |  |
| Hardness, Vickers          | 350   | 350   |  |
| Tensile Strength, Ultimate | 1050 MPa                                    | 152000 psi                                    |  |
| Tensile Strength, Yield    | 925 MPa                                     | 134000 psi                                    |  |
| Elongation at Break        | 12.0 %                                      | 12.0 %  |  |
| Reduction of Area          | 15.0 %                                      | 15.0 %  |  |
| Modulus of Elasticity      | 120 GPa                                     | 17400 ksi                                     |  |
| Poissons Ratio             | 0.310                                       | 0.310   | Typical for alpha titanium alloy.                    |
| Charpy Impact              | 15.0 J                                      | 11.1 ft-lb                                    | V-notch  |
| Fatigue Strength           | 340 MPa<br># of Cycles 1.00e+7              | 49300 psi<br># of Cycles 1.00e+7              | k <sub>t</sub> = 2.0, wrought 50 mm diameter bar.    |
|                            | 530 MPa<br># of Cycles 400000               | 76900 psi<br># of Cycles 400000               | k <sub>t</sub> = 2.0, heat treated bar, axial stress |
|                            | 530 MPa<br># of Cycles 1.00e+7              | 76900 psi<br># of Cycles 1.00e+7              | Unnotched  |
|                            | 900 MPa<br># of Cycles 10000                | 131000 psi<br># of Cycles 10000               | heat treated bar, axial stress, Unnotched            |
| Fracture Toughness         | 45.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                   | 41.0 ksi-in <sup>1/2</sup>                    |  |
| Shear Modulus              | 45.8 GPa                                    | 6640 ksi                                      | Calculated from typical values.                      |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                             | 0.000160 ohm-cm                               | Estimated from similar alpha titanium alloys.        |
| CTE, linear 20°C           | 10.6 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 200 °C  | 5.89 µin/in-°F<br>@Temperature 68.0 - 392 °F  |  |
|                            | 10.9 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 400 °C  | 6.06 µin/in-°F<br>@Temperature 68.0 - 752 °F  | average  |
|                            | 11.0 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 600 °C  | 6.11 µin/in-°F<br>@Temperature 68.0 - 1110 °F | average  |
|                            | 11.3 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 1000 °C | 6.28 µin/in-°F<br>@Temperature 68.0 - 1830 °F |  |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                                | 0.125 BTU/lb-°F                               | Typical value for titanium alloys.                   |
| Thermal Conductivity       | 7.00 W/m-K                                  | 48.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F            | Estimated from similar titanium alloys.              |
| Beta Transus               | 1045 °C                                     | 1913 °F                                       |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 31

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TITANIUM TITANIUM 1100  
BETA QUENCHED AND ANNEALED**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Titanium 1100

Components; Wt. %; Al; 6; Mo; 0.4; Sn 2.7; Zr; 4; Ti; 87

| Physical Properties        | Metric                                    | English                                     | Comments                                      |
|----------------------------|---|---|---|
| Density                    | 4.50 g/cc                                 | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                    |   |
| Tensile Strength, Ultimate | 750 MPa<br>Temperature 400 °C             | 109000 psi<br>Temperature 752 °F            |   |
|                            | 1010 MPa                                  | 146000 psi                                  |   |
| Tensile Strength, Yield    | 625 MPa<br>Temperature 400 °C             | 90600 psi<br>Temperature 752 °F             |   |
|                            | 910 MPa                                   | 132000 psi                                  |   |
| Elongation at Break        | 11.0 %                                    | 11.0 %                                      |   |
| Modulus of Elasticity      | 107 - 117 GPa                             | 15500 - 17000 ksi                           |   |
| Poissons Ratio             | 0.310                                     | 0.310                                       | Typical for alpha titanium alloy.             |
| Fatigue Strength           | 250 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 36300 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | notched with K <sub>t</sub> = 3.0.            |
|                            | 655 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 95000 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | notched with K <sub>t</sub> = 1.0.            |
| Fracture Toughness         | 63.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                 | 57.3 ksi-in <sup>1/2</sup>                  | K(IC) after 1095°C anneal                     |
| Shear Modulus              | 42.7 GPa                                  | 6190 ksi                                    | Calculated from typical values.               |
| Electrical Resistivity     | 0.000160 ohm-cm                           | 0.000160 ohm-cm                             | Estimated from similar alpha titanium alloys. |
| CTE, linear 20°C           | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F | Typical alpha titanium alloy                  |
| Specific Heat Capacity     | 0.525 J/g-°C                              | 0.125 BTU/lb-°F                             | Typical value for titanium alloys.            |
| Thermal Conductivity       | 7.00 W/m-K                                | 48.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          | Estimated from similar titanium alloys.       |
| Beta Transus               | 1015 °C                                   | 1859 °F                                     |   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 32

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ALLVAC® 3-2.5 TITANIUM  
ALLOY, HEAT TREATMENT: 704°C (1300°F) ANNEAL**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

**Key Words:** UNS R56320; AMS 4943, 4944; MIL-T-9046, -9047. ASTM B 265, 337, 338, 348, 381, Ti-3Al-2.5V; Half 6-4; Ti-3-2.5; Allvac, an Allegheny Teledyne Company

**Components; Wt. %;** Al; 3; C; Max 0.05; H; Max 0.015; Fe; 0.13; O; 0.1; V; 2.5; Ti; 94

**Material Notes:** Titanium content calculated as remainder. Data provided by Allvac.

**Applications:** Excellent cold formability, 20-50% higher tensile properties than CP titanium grades. Primarily used in aircraft hydraulic systems.

| <b>Physical Properties</b> | <b>Metric</b> | <b>English</b>           | <b>Comments</b>  |
|----------------------------|---------------|--------------------------|--|
| Density                    | 4.48 g/cc     | 0.162 lb/in <sup>3</sup> |  |
| Hardness, Brinell          | 256           | 256                      | Estimated from Rockwell C value for Brinell test with 3000 kg load/10 mm diameter ball |
| Hardness, Knoop            | 278           | 278                      | Estimated from Rockwell C value.   |
| Hardness, Rockwell C       | 24.0          | 24.0                     |  |
| Hardness, Vickers          | 269           | 269                      | Estimated from Rockwell C value.   |
| Tensile Strength, Ultimate | 690 MPa       | 100000 psi               |  |
| Tensile Strength, Yield    | 586 MPa       | 85000 psi                | 0.2% Offset  |
| Elongation at Break        | 15.0 %        | 15.0 %                   |  |
| Reduction of Area          | 25.0 %        | 25.0 %                   |  |



ПРИЛОЖЕНИЕ 33

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ALLVAC® 8-1-1 TITANIUM  
ALLOY, HEAT TREATMENT: 982°C (1800°F) + AGE**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: UNS R54810; AMS 4915, 4933, 4972. MIL-T-81556, -83142, Ti-8Al-1Mo-1V; Ti-811; Allvac, an Allegheny Teledyne Company

Components; Wt. %; Al; 8; C; 0.03; H; Max 0.015; Fe; 0.13; Mo; 1; N; 0.01; P; 0.2; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Titanium content calculated as remainder. Data provided by Allvac.

Applications: Fan & compressor blades, discs, spacers, seals, rings. Excellent creep resistance. Standard, rotor/premium grades.

| Physical Properties        | Metric    | English                  | Comments   |
|----------------------------|-----------|--------------------------|--|
| Density                    | 4.31 g/cc | 0.156 lb/in <sup>3</sup> |  |
| Hardness, Brinell          | 326       | 326                      | Estimated from Rockwell C value for Brinell test with 3000 kg load/10 mm diameter ball |
| Hardness, Knoop            | 354       | 354                      | Estimated from Rockwell C value.   |
| Hardness, Rockwell C       | 35.0      | 35.0                     |  |
| Hardness, Vickers          | 341       | 341                      | Estimated from Rockwell C value.   |
| Tensile Strength, Ultimate | 1035 MPa  | 150100 psi               |  |
| Tensile Strength, Yield    | 966 MPa   | 140000 psi               | 0.2% Offset  |
| Elongation at Break        | 15.0 %    | 15.0 %                   |  |
| Reduction of Area          | 40.0 %    | 40.0 %                   |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 34

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ALLVAC® 6-2-4-2 TITANIUM  
ALLOY, HEAT TREATMENT: 982°C (1800°F) + AGE**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: UNS R54620; AMS 4919, 4975, 4976. MIL-T-9046, -9047, -81556, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-6242; Ti-6-2-4-2; Allvac, an Allegheny Teledyne Company

Components; Wt. %; Al; 6; C; Max 0.1; H; Max 0.015; Fe; 0.05; Mo; 2; N; 0.04; O; 0.2; Sn; 2; Zr; 4; Ti; 86

Material Notes: Titanium content calculated as remainder. Data provided by Allvac.

Applications: High-temp jet engines. Blades, discs, spacers, seals. High performance automotive valves. Standard, rotor/premium grades.

| Physical Properties        | Metric    | English                  | Comments   |
|----------------------------|-----------|--------------------------|--|
| Density                    | 4.54 g/cc | 0.164 lb/in <sup>3</sup> |  |
| Hardness, Brinell          | 318       | 318                      | Estimated from Rockwell C value for Brinell test with 3000 kg load/10 mm diameter ball |
| Hardness, Knoop            | 346       | 346                      | Estimated from Rockwell C value.   |
| Hardness, Rockwell C       | 34.0      | 34.0                     |  |
| Hardness, Vickers          | 333       | 333                      | Estimated from Rockwell C value.   |
| Tensile Strength, Ultimate | 1035 MPa  | 150100 psi               |  |
| Tensile Strength, Yield    | 966 MPa   | 140000 psi               | 0.2% Offset  |
| Elongation at Break        | 15.0 %    | 15.0 %                   |  |
| Reduction of Area          | 30.0 %    | 30.0 %                   |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 35

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ALLEGHENY LUDLUM GRADE 9  
TITANIUM (UNS R56320)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: ASTM B-265; DIN 3.7195

Components; Wt. %; Al; 3; C; Max 0.05; H; Max 0.015; Fe; Max 0.13; N; Max 0.01; O; Max 0.1; V; 2.5; Ti; 94.5

Material Notes: Titanium content above calculated as remainder. Mechanical property data below is typical of annealed samples at room temperature.

Information provided by Allegheny Ludlum.

Applications: Heat exchangers, industrial components, tubing.

| Physical Properties        | Metric    | English                  | Comments |
|----------------------------|-----------|--------------------------|----------|
| Density                    | 4.59 g/cc | 0.166 lb/in <sup>3</sup> |          |
| Hardness, Rockwell C       | 25.0      | 25.0                     |          |
| Tensile Strength, Ultimate | 760 MPa   | 110000 psi               |          |
| Tensile Strength, Yield    | 655 MPa   | 95000 psi                | 0.2% YS  |
| Elongation at Break        | 15.0 %    | 15.0 %                   |          |

ПРИЛОЖЕНИЕ 36

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ALLEGHENY LUDLUM GRADE  
18 TITANIUM (UNS R56322)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: ASTM B-265

Components; Wt. %; Al; 3; C; Max 0.05; H; Max 0.015; Fe; Max 0.13; N; Max 0.01; O; Max 0.1; V; 2.5; Ti; 94.5

Material Notes: Titanium content above calculated as remainder. Mechanical property data below is typical of annealed samples at room temperature.

Information provided by Allegheny Ludlum.

Applications: Heat exchangers, industrial components, tubing.

| Physical Properties        | Metric    | English                  | Comments |
|----------------------------|-----------|--------------------------|----------|
| Density                    | 4.52 g/cc | 0.163 lb/in <sup>3</sup> |          |
| Hardness, Rockwell C       | 25.0      | 25.0                     |          |
| Tensile Strength, Ultimate | 760 MPa   | 110000 psi               |          |
| Tensile Strength, Yield    | 655 MPa   | 95000 psi                | 0.2% YS  |
| Elongation at Break        | 15.0 %    | 15.0 %                   |          |

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 1100  
TITANIUM ALLOY (TI-6AL-2.7SN-4ZR-0.4MO-0.45SI)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 6; Mo; 0.4; Si; 0.45; Sn; 2.7; Zr; 4; Ti; 86.5

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range.

Features: A near alpha, high temperature creep resistant alloy developed for elevated temperature use in the range of 600°C that offers the highest combination of strength, creep resistance, fracture toughness and fatigue crack growth resistance. Data provided by TIMET.

| Physical Properties              | Metric    | English                  | Comments                           |
|----------------------------------|-----------|--------------------------|------------------------------------|
| Density                          | 4.50 g/cc | 0.163 lb/in <sup>3</sup> | Typical                            |
| Tensile Strength, Ultimate       | 1000 MPa  | 145000 psi               | Typical                            |
| Tensile Strength, Yield          | 910 MPa   | 132000 psi               | Typical 0.2% Proof Stress          |
| Elongation at Break              | 8.00 %    | 8.00 %                   | Typical                            |
| Modulus of Elasticity            | 120 GPa   | 17400 ksi                | Typical                            |
| Fatigue Strength                 | 500 MPa   | 72500 psi                | Limit; test specifics not reported |
| Bend Radius, Minimum             | 6.00 t    | 6.00 t                   | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet  |
| Maximum Service Temperature, Air | 600 °C    | 1110 °F                  |                                    |
| Beta Transus                     | 1015 °C   | 1859 °F                  |                                    |

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 230**  
**TITANIUM ALLOY (TI-2.5CU); ANNEALED**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; C; Max 0.08; Cu; 2-3; H; Max 0.01; Fe; Max 0.2; N; Max 0.03; O; Max 0.2; Ti; 96.1-98

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Formable Medium-Strength Alloy. Industry

Specifications: Germany Aerospace: 3.7124. France: T-U2. UK Aerospace

Specifications BA TA. 21, 22, 23. Typical heat treatment for this alloy: Anneal at 790°C for 1 hour and air cool. Solution heat treatment at 805°C for 1 hour with a rapid air cool. Aging heat treatment at 400°C for 8-24 hours with an air cool and then for 8 hours at 475°C with air cool. Data provided by TIMET.

Features: This binary, age hardening alloy combines the easy formability and weldability of commercially pure titanium with improved mechanical properties, particularly at temperatures up to 350°C. It is used in the annealed condition as sheet, forgings, and extrusions for fabricating components such as bypass ducts of gas-turbine engines. Its used spread to the airframe industry, following the development of an ageing treatment which raises room-temperature tensile properties by about 25%, and nearly doubles the elevated temperature properties. Such a material is particularly attractive since it can be formed in the soft condition, thus lowering fabrication costs. It is nonmagnetic.

| Physical Properties              | Metric                                     | English                                      | Comments                             |
|----------------------------------|--|--|--------------------------------------|
| Density                          | 4.56 g/cc                                  | 0.165 lb/in <sup>3</sup>                     | Typical                              |
| Tensile Strength, Ultimate       | 620 MPa                                    | 89900 psi                                    | Typical                              |
| Tensile Strength, Yield          | 510 MPa                                    | 74000 psi                                    | Typical 0.2% Proof Stress            |
| Elongation at Break              | 25.0 %                                     | 25.0 %                                       | Typical                              |
| Reduction of Area                | >= 35.0 %                                  | >= 35.0 %                                    |                                      |
| Modulus of Elasticity            | 105 - 120 GPa                              | 15200 - 17400 ksi                            | Typical                              |
| Fatigue Strength                 | 280 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 40600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | Rod, smooth, direct stress           |
|                                  | 370 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 53700 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | Rod, rotating bend                   |
|                                  | 390 MPa<br># of Cycles 1.00e+7             | 56600 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | Sheet; Reverse Bend; (UTS = 864 MPa) |
| Bend Radius, Minimum             | 2.50 t                                     | 2.50 t                                       | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet    |
| Electrical Resistivity           | 0.0000650 ohm-cm                           | 0.0000650 ohm-cm                             |                                      |
| CTE, linear 20°C                 | 9.00 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 100 °C | 5.00 µin/in-°F<br>@Temperature 68.0 - 212 °F |                                      |
| Thermal Conductivity             | 12.97 W/m-K                                | 90.01 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          |                                      |
| Maximum Service Temperature, Air | 350 °C                                     | 662 °F                                       |                                      |
| Beta Transus                     | 895 °C                                     | 1640 °F                                      |                                      |

ПРИЛОЖЕНИЕ 39

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 230**  
**TITANIUM ALLOY (Ti-2.5Cu); STA**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; C; Max 0.08; Cu; 2-3; H; Max 0.01; Fe; Max 0.2; N; Max 0.03; O; Max 0.2; Ti; 96.1-98

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Formable Medium-Strength Alloy. Typical heat treatment for this alloy: Anneal at 790°C for 1 hour and air cool. Solution heat treatment at 805°C for 1 hour with a rapid air cool. Aging heat treatment at 400°C for 8-24 hours with an air cool and then for 8 hours at 475°C with air cool. Data provided by TIMET.

Features: This binary, age hardening alloy combines the easy formability and weldability of commercially pure titanium with improved mechanical properties, particularly at temperatures up to 350°C. It is used in the annealed condition as sheet, forgings, and extrusions for fabricating components such as bypass ducts of gas-turbine engines. Its used spread to the airframe industry, following the development of an ageing treatment which raises room-temperature tensile properties by about 25%, and nearly doubles the elevated temperature properties. Such a material is particularly attractive since it can be formed in the soft condition, thus lowering fabrication costs. It is nonmagnetic.

| Physical Properties        | Metric                                    |   | English                  | Comments  |
|----------------------------|---|---|--------------------------|---|
| Density                    |   | 4.56 g/cc                                   | 0.165 lb/in <sup>3</sup> | Typical   |
| Tensile Strength, Ultimate | 760 MPa                                   | 110000 psi                                  |                          | Typical   |
| Tensile Strength, Yield    | 600 MPa                                   | 87000 psi                                   |                          | Typical 0.2% Proof Stress                         |
| Elongation at Break        | 20.0 %                                    | 20.0 %                                      |                          | Typical   |
| Reduction of Area          | >= 25.0 %                                 | >= 25.0 %                                   |                          |   |
| Modulus of Elasticity      | 105 - 120 GPa                             | 15200 - 17400 ksi                           |                          | Typical   |
| Fatigue Strength           | 200 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 29000 psi<br># of Cycles 1.00e+7            |                          | Rod, notched, Kt = 3.3, direct stress             |
|                            | 450 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 65300 psi<br># of Cycles 1.00e+7            |                          | Rod, rotating bend (UTS = 791 MPa)                |
|                            | 470 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 68200 psi<br># of Cycles 1.00e+7            |                          | rod, smooth, direct stress (UTS = 791 MPa)        |
|                            | 490 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 71100 psi<br># of Cycles 1.00e+7            |                          | Sheet; Reverse Bend (UTS = 772 MPa)               |
|                            | 570 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 82700 psi<br># of Cycles 1.00e+7            |                          | Sheet; Direct Stress (0-570 MPa); (UTS = 761 MPa) |
| Electrical Resistivity     | 0.0000650 ohm-cm                          | 0.0000650 ohm-cm                            |                          |   |
| CTE, linear                | 9.00 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.00 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F |                          |   |
| Thermal Conductivity       | 12.97 W/m-K                               | 90.01 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F         |                          |   |
| Beta Transus               | 895 °C                                    | 1640 °F                                     |                          |   |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 40

## СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 3-2.5 TITANIUM ALLOY (TI-3AL-2.5V; ASTM GRADE 9) TYPICAL PROPERTIES

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Titanium 3-2.5; UNS R56320

Components; Wt. %; Al; 2.5-3.5; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.25; N; Max 0.03; O; Max 0.15; V; 2-3; Ti; 92.6-95.5

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Workable Medium Strength Alloy. Typical heat treatment for this alloy: Stress Relief: 316-649°C for .5-3 hrs, air cool. Anneal: 649-760°C for 1-3 hrs, air cool. Solution treat: 871-927°C for .25-1 hrs, water quench. Aging: 482-538°C for 2-8 hrs, air cool. Data provided by TIMET. Features: Cold formable and weldable, this alloy is used primarily for honeycomb foil and hydraulic tubing applications. Industrial applications such as pressure vessels and piping also utilize this alloy. Available with palladium stabilization to enhance corrosion resistance. The alloy is cold formable and easily welded, such like the commercially pure grades of titanium. Yet the alloys offer nearly double the strength over TIMETAL 50A. It is ASME Boiler and Pressure Vessel code approved. It offers the highest structural efficiency of any of the common engineering metals approved by ASME. The alloy is available in all common product forms including billet, bar, plate, sheet, strip, tubing and pipe. It is nonmagnetic.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments                           |
|----------------------------|--|---|------------------------------------|
| Density                    | 4.51 g/cc                                  | 0.163 lb/in³                                | Typical                            |
| Tensile Strength, Ultimate | 650 MPa                                    | 94300 psi                                   | Typical                            |
| Tensile Strength, Yield    | 550 MPa                                    | 79800 psi                                   | Typical 0.2% Proof Stress          |
| Elongation at Break        | 15.0 %                                     | 15.0 %                                      | Typical                            |
| Modulus of Elasticity      | 105 - 120 GPa                              | 15200 - 17400 ksi                           | Typical                            |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300                                       |                                    |
| Fatigue Strength           | 325 MPa                                    | 47100 psi                                   | Limit; test specifics not reported |
| Shear Modulus              | 43.0 - 45.0 GPa                            | 6240 - 6530 ksi                             |                                    |
| Bend Radius, Minimum       | 2.50 t                                     | 2.50 t                                      | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet  |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                             |                                    |
| CTE, linear 20°C           | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F |                                    |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft²-°F                       | 20-95°C                            |
| Melting Point              | 1700 °C                                    | 3090 °F                                     |                                    |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                     |                                    |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 41



## СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 3-2.5 TITANIUM ALLOY (TI-3AL-2.5V; ASTM GRADE 9) ANNEALED

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Titanium 3-2.5; UNS R56320

Components; Wt. %; Al; 2.5-3.5; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.25; N; Max 0.03; O; Max 0.15; V; 2-3; Ti; 92.6-95.5

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Workable Medium Strength Alloy. UTS, TYS, Elongation, R.A. and bend radius data below are specific to annealed material; other specific condition entries are also available in MatWeb. Typical heat treatment for this alloy: Stress Relief: 316-649°C for .5-3 hrs, air cool. Anneal: 649-760°C for 1-3 hrs, air cool. Solution treat: 871-927°C for .25-1 hrs, water quench. Aging: 482-538°C for 2-8 hrs, air cool. Data provided by TIMET.

Features: Cold formable and weldable, this alloy is used primarily for honeycomb foil and hydraulic tubing applications. Industrial applications such as pressure vessels and piping also utilize this alloy. Available with palladium stabilization to enhance corrosion resistance. The alloy is cold formable and easily welded, such like the commercially pure grades of titanium. Yet the alloys offer nearly double the strength over TIMETAL 50A. It is ASME Boiler and Pressure Vessel code approved. It offers the highest structural efficiency of any of the common engineering metals approved by ASME. The alloy is available in all common product forms including billet, bar, plate, sheet, strip, tubing and pipe. It is nonmagnetic.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments |
|----------------------------|--|---|----------|
| Density                    | 4.51 g/cc                                  | 0.163 lb/in³                                | Typical  |
| Tensile Strength, Ultimate | >= 620 MPa                                 | >= 89900 psi                                |          |
| Tensile Strength, Yield    | >= 483 MPa                                 | >= 70100 psi                                |          |
| Elongation at Break        | >= 15.0 %                                  | >= 15.0 %                                   |          |
| Reduction of Area          | >= 30.0 %                                  | >= 30.0 %                                   |          |
| Modulus of Elasticity      | 105 - 120 GPa                              | 15200 - 17400 ksi                           | Typical  |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300                                       | Typical  |
| Shear Modulus              | 43.0 - 45.0 GPa                            | 6240 - 6530 ksi                             |          |
| Bend Radius, Minimum       | 5.00 - 6.00 t                              | 5.00 - 6.00 t                               |          |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                             |          |
| CTE, linear                | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F |          |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft²-°F                       | 20-95°C  |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                  |          |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                     |          |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                     |          |

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 3-2.5  
TITANIUM ALLOY (TI-3AL-2.5V; ASTM GRADE 9) AGED**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Titanium 3-2.5; UNS R56320

Components; Wt. %; Al; 2.5-3.5; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.25; N; Max 0.03; O; Max 0.15; V; 2-3; Ti; 92.6-95.5

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Workable Medium Strength Alloy. UTS, TYS, and elongation data below are specific to aged material; other specific condition entries are also available in MatWeb. Typical heat treatment for this alloy: Stress Relief: 316-649°C for .5-3 hrs, air cool. Anneal: 649-760°C for 1-3 hrs, air cool. Solution treat: 871-927°C for .25-1 hrs, water quench. Aging: 482-538°C for 2-8 hrs, air cool. Data provided by TIMET.

Features: Cold formable and weldable, this alloy is used primarily for honeycomb foil and hydraulic tubing applications. Industrial applications such as pressure vessels and piping also utilize this alloy. Available with palladium stabilization to enhance corrosion resistance. The alloy is cold formable and easily welded, such like the commercially pure grades of titanium. Yet the alloys offer nearly double the strength over TIMETAL 50A. It is ASME Boiler and Pressure Vessel code approved. It offers the highest structural efficiency of any of the common engineering metals approved by ASME. The alloy is available in all common product forms including billet, bar, plate, sheet, strip, tubing and pipe. It is nonmagnetic.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments |
|----------------------------|--|---|----------|
| Density                    | 4.51 g/cc                                  | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                    | Typical  |
| Tensile Strength, Ultimate | >= 828 MPa                                 | >= 120000 psi                               |          |
| Tensile Strength, Yield    | >= 690 MPa                                 | >= 100000 psi                               |          |
| Elongation at Break        | >= 8.00 %                                  | >= 8.00 %                                   |          |
| Modulus of Elasticity      | 105 - 120 GPa                              | 15200 - 17400 ksi                           | Typical  |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300                                       |          |
| Shear Modulus              | 43.0 - 45.0 GPa                            | 6240 - 6530 ksi                             |          |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                             |          |
| CTE, linear                | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F |          |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          | 20-95°C  |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                  |          |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                     |          |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                     |          |

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 3-2.5  
TITANIUM ALLOY (TI-3AL-2.5V; ASTM GRADE 9) CWSR**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

**Key Words:** Titanium 3-2.5; UNS R56320

**Components; Wt. %;** Al; 2.5-3.5; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.25; N; Max 0.03; O; Max 0.15; V; 2-3; Ti; 92.6-95.5

**Material Notes:** Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Workable Medium Strength Alloy. UTS, TYS, and elongation data below are specific to CWSR condition; other specific condition entries are also available in MatWeb. Typical heat treatment for this alloy: Stress Relief: 316-649°C for .5-3 hrs, air cool. Anneal: 649-760°C for 1-3 hrs, air cool. Solution treat: 871-927°C for .25-1 hrs, water quench. Aging: 482-538°C for 2-8 hrs, air cool. Data provided by TIMET.

**Features:** Cold formable and weldable, this alloy is used primarily for honeycomb foil and hydraulic tubing applications. Industrial applications such as pressure vessels and piping also utilize this alloy. Available with palladium stabilization to enhance corrosion resistance. The alloy is cold formable and easily welded, such like the commercially pure grades of titanium. Yet the alloys offer nearly double the strength over TIMETAL 50A. It is ASME Boiler and Pressure Vessel code approved. It offers the highest structural efficiency of any of the common engineering metals approved by ASME. The alloy is available in all common product forms including billet, bar, plate, sheet, strip, tubing and pipe. It is nonmagnetic.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments |
|----------------------------|--|---|----------|
| Density                    | 4.51 g/cc                                  | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                    | Typical  |
| Tensile Strength, Ultimate | >= 862 MPa                                 | >= 125000 psi                               |          |
| Tensile Strength, Yield    | >= 724 MPa                                 | >= 105000 psi                               |          |
| Elongation at Break        | >= 10.0 %                                  | >= 10.0 %                                   |          |
| Modulus of Elasticity      | 105 - 120 GPa                              | 15200 - 17400 ksi                           | Typical  |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300                                       |          |
| Shear Modulus              | 43.0 - 45.0 GPa                            | 6240 - 6530 ksi                             |          |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                             |          |
| CTE, linear                | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F |          |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          | 20-95°C  |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                  |          |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                     |          |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                     |          |

## СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 3-2.5 -0.05PD TITANIUM ALLOY

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: Titanium 3-2.5;

Components; Wt. %; Al; 2.5-3.5; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.25; N; Max 0.03; O; Max 0.15; Pd; 0.04-0.08; V; 2-3; Ti; 92.5-95.5

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Cold Workable Medium Strength Alloy. Palladium is added to this grade to enhance its corrosion behavior. Property data below is typical of TIMETAL® 3-2.5 Titanium Alloy. Data provided by TIMET.

| Physical Properties        | Metric                                     | English                                     | Comments                          |
|----------------------------|--|---|-----------------------------------|
| Density                    | 4.51 g/cc                                  | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                    | Typical                           |
| Tensile Strength, Ultimate | 650 MPa                                    | 94300 psi                                   | Typical                           |
| Tensile Strength, Yield    | 550 MPa                                    | 79800 psi                                   | Typical 0.2% Proof Stress         |
| Elongation at Break        | 15.0 %                                     | 15.0 %                                      | Typical                           |
| Modulus of Elasticity      | 105 - 120 GPa                              | 15200 - 17400 ksi                           | Typical                           |
| Poissons Ratio             | 0.300                                      | 0.300                                       |                                   |
| Shear Modulus              | 43.0 - 45.0 GPa                            | 6240 - 6530 ksi                             |                                   |
| Bend Radius, Minimum       | 2.50 t                                     | 2.50 t                                      | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet |
| Electrical Resistivity     | 0.000127 ohm-cm                            | 0.000127 ohm-cm                             |                                   |
| CTE, linear 20°C           | 9.61 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 95.0 °C | 5.34 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 203 °F |                                   |
| Thermal Conductivity       | 8.30 W/m-K                                 | 57.6 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          | 20-95°C                           |
| Melting Point              | <= 1700 °C                                 | <= 3090 °F                                  |                                   |
| Liquidus                   | 1700 °C                                    | 3090 °F                                     |                                   |
| Beta Transus               | 935 °C                                     | 1720 °F                                     |                                   |

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 5111  
TITANIUM ALLOY (Ti-5Al-1Sn-1Zr-1V-0.8Mo; ASTM GRADE 32)

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 4.5-5.5; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.25; Mo; 0.6-1.2; N; Max 0.03; O; Max 0.11; Si; 0.06-0.14; Sn; 0.6-1.4; V; 0.6-1.4; Zr; 0.6-1.4; Ti; 88.5-93.0

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. High Toughness, Heavy Section Weldable Alloy.

Data provided by TIMET.

Features: A near alpha alloy with excellent weldability, seawater stress corrosion cracking resistance and high dynamic toughness. It is ideally suited for applications in marine environments where toughness and corrosion resistance are essential. The alloy has been produced on a commercial scale. It was developed jointly with the Navy, and has been selected as the material of choice for a submarine application.

| Physical Properties        | Metric                              | English                              | Comments                          |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Density                    | 4.43 g/cc                           | 0.160 lb/in <sup>3</sup>             | Typical                           |
| Tensile Strength, Ultimate | 862 MPa                             | 125000 psi                           | Typical                           |
| Tensile Strength, Yield    | 758 MPa                             | 110000 psi                           | Typical 0.2% Proof Stress         |
| Elongation at Break        | 15.0 %                              | 15.0 %                               | Typical                           |
| Reduction of Area          | 30.0 %                              | 30.0 %                               |                                   |
| Modulus of Elasticity      | 107 - 114 GPa                       | 15500 - 16500 ksi                    | Typical                           |
| Bend Radius, Minimum       | 5.00 t                              | 5.00 t                               | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet |
| Electrical Resistivity     | 0.000153 ohm-cm                     | 0.000153 ohm-cm                      |                                   |
| CTE, linear 20°C           | 8.20 µm/m-°C<br>Temperature 50.0 °C | 4.56 µin/in-°F<br>Temperature 122 °F |                                   |
|                            | 9.30 µm/m-°C<br>Temperature 250 °C  | 5.17 µin/in-°F<br>Temperature 482 °F |                                   |
| Specific Heat Capacity     | 0.533 J/g-°C                        | 0.127 BTU/lb-°F                      |                                   |
| Thermal Conductivity       | 7.50 W/m-K                          | 52.0 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F   |                                   |
| Beta Transus               | 980 °C                              | 1800 °F                              |                                   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 46

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 6-2-4-2 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si) TITANIUM ALLOY

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: UNS R54620

Components; Wt. %; Al; 5.5-6.5; C; Max 0.08; H; 0.01-0.0125; Fe; Max 0.25; Mo; 1.8-2.2; N; Max 0.05; O; Max 0.15; Si; 0.06-0.13; Sn; 1.8-2.2; Zr; 3.6-4.4; Ti; 83.6-87.2

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Medium-Strength, Elevated Temperature Alloy.

Industry Specifications: USA Aerospace: AMS 4919. Typical heat treatment for this alloy: Rough forging: 1038°C. Stress relief anneal: 482-649°C for 1-4 hrs, air cool. Solution treatment: 15-30°C below beta transus for 1 hour, water quench. Aging: 538-593°C for 8 hrs, air cool. Data provided by TIMET.

Features: TIMETAL 6-2-4-2 has good tensile creep and fatigue properties up to 540°C. It is the most commonly used high temperature alloy in jet engine compressors and airframe structures. It is also used in sheet melt form for engine afterburner structure and for various hot airframe skin applications. It is nonmagnetic.

| Physical Properties              | Metric                                     | English                                     | Comments                           |
|----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| Density                          | 4.54 g/cc                                  | 0.164 lb/in <sup>3</sup>                    | Typical                            |
| Tensile Strength, Ultimate       | 1000 MPa                                   | 145000 psi                                  | Typical                            |
| Tensile Strength, Yield          | 895 MPa                                    | 130000 psi                                  | Typical 0.2% Proof Stress          |
| Elongation at Break              | 12.0 %                                     | 12.0 %                                      | Typical                            |
| Reduction of Area                | 42.0 %                                     | 42.0 %                                      |                                    |
| Modulus of Elasticity            | 115 GPa                                    | 16700 ksi                                   | Typical                            |
| Fatigue Strength                 | 500 MPa                                    | 72500 psi                                   | Limit; test specifics not reported |
| Bend Radius, Minimum             | 4.50 t                                     | 4.50 t                                      | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet  |
| Electrical Resistivity           | 0.000185 ohm-cm                            | 0.000185 ohm-cm                             |                                    |
| CTE, linear 20°C                 | 7.70 µm/m-°C<br>Temperature 0.000 - 100 °C | 4.28 µin/in-°F<br>Temperature 32.0 - 212 °F |                                    |
| Thermal Conductivity             | 6.92 W/m-K                                 | 48.0 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          |                                    |
| Melting Point                    | <= 1705 °C                                 | <= 3101 °F                                  |                                    |
| Liquidus                         | 1705 °C                                    | 3101 °F                                     |                                    |
| Maximum Service Temperature, Air | 538 °C                                     | 1000 °F                                     | Long Term                          |
| Beta Transus                     | 996 °C                                     | 1820 °F                                     |                                    |

ПРИЛОЖЕНИЕ 47

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 685 (Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si) TITANIUM ALLOY**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 5.7-6.3; C; Max 0.08; Fe; Max 0.05; Mo; 0.25-0.75; N; Max 0.03; O; Max 0.2; Si; 0.015-0.35; Zr; 4.5-6.0; Ti; 85.8-89.5

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. High-Temperature, High-Strength Creep Resistant Alloy.

Industry Specifications: Germany Aerospace: 3.7154. France: T-A6ZD. UK

Aerospace Specifications BS TA. 43, 44. Typical heat treatment for this alloy:

Solution heat treatment: 1050°C for 30 mins, oil quench. Aging heat treatment: 550°C for 24 hours, air cool. Data provided by TIMET.

Features: TIMETAL 685 possesses excellent tensile strength and creep resistance up to 520°C. It is weldable and has good forging characteristics. The alloy may be joined by the processes normally used in the fabrication of titanium, including argon-arc, electron beam and friction welding. Material should be fully heat treated prior to welding, and also given a suitable post-weld treatment. The weld zone of material treated in this way will have similar structure and properties to the parent metal. This alloy was specifically designed for the aero-engine industry. It is nonmagnetic.

| Physical Properties              | Metric                                    | English                                     | Comments  |
|----------------------------------|---|---|---|
| Density                          | 4.45 g/cc                                 | 0.161 lb/in <sup>3</sup>                    | Typical   |
| Tensile Strength, Ultimate       | 1030 MPa                                  | 149000 psi                                  | Typical   |
| Tensile Strength, Yield          | 900 MPa                                   | 131000 psi                                  | Typical 0.2% Proof Stress                       |
| Elongation at Break              | 10.0 %                                    | 10.0 %                                      | Typical in 5D                                   |
| Reduction of Area                | 20.0 %                                    | 20.0 %                                      |   |
| Modulus of Elasticity            | 125 GPa                                   | 18100 ksi                                   | Typical   |
| Notched Tensile Strength         | 1648 MPa                                  | 239000 psi                                  | Kt=3  |
| Poissons Ratio                   | 0.330                                     | 0.330                                       | Calculated by MatWeb                            |
| Charpy Impact                    | 43.0 J                                    | 31.7 ft-lb                                  | at 20°C for 25 mm rod                           |
| Fatigue Strength                 | 440 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 63800 psi<br># of Cycles 1.00e+7            | alternating direct-stress<br>(zero mean stress) |
|                                  | 630 MPa<br># of Cycles 100000             | 91400 psi<br># of Cycles 100000             | alternating direct-stress<br>(zero mean stress) |
| Fracture Toughness               | 68.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                 | 61.9 ksi-in <sup>1/2</sup>                  | K(IC); Typical                                  |
| Shear Modulus                    | 47.0 GPa                                  | 6820 ksi                                    |   |
| Electrical Resistivity           | 0.000167 ohm-cm                           | 0.000167 ohm-cm                             |   |
| CTE, linear 20°C                 | 9.50 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 300 °C | 5.28 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 572 °F |   |
|                                  | 9.70 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 100 °C | 5.39 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 212 °F |   |
|                                  | 10.1 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 500 °C | 5.61 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 932 °F |   |
| Thermal Conductivity             | 4.15 W/m-K                                | 28.8 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F          |   |
| Maximum Service Temperature, Air | 520 °C                                    | 968 °F                                      | Good creep resistance                           |
| Beta Transus                     | 1020 °C                                   | 1870 °F                                     |   |

ПРИЛОЖЕНИЕ 48

## СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET 8-1-1 TITANIUM ALLOY (TI-8AL-1MO-1V); ANNEALED SHEET

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Key Words: UNS R54810

Components; Wt. %; Al; 8; Mo; 1; V; 1; Ti; 90

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Industry Specifications: USA Aerospace: AMS 4915,4916. France: T-A8DV. Data provided by TIMET.

Features: Designed for creep resistance up to 450°C, used primarily in engine applications such as forged compressor blades and disks. This alloy has a relatively high tensile modulus to density ratio compared to most commercial titanium alloys.

| Physical Properties        | Metric    | English                  | Comments                           |
|----------------------------|-----------|--------------------------|------------------------------------|
| Density                    | 4.36 g/cc | 0.158 lb/in <sup>3</sup> | Typical                            |
| Tensile Strength, Ultimate | 1020 MPa  | 148000 psi               | Typical                            |
| Tensile Strength, Yield    | 930 MPa   | 135000 psi               | Typical 0.2% Proof Stress          |
| Elongation at Break        | 13.0 %    | 13.0 %                   | Typical                            |
| Modulus of Elasticity      | 125 GPa   | 18100 ksi                | Typical                            |
| Fatigue Strength           | 460 MPa   | 66700 psi                | Limit; test specifics not reported |
| Bend Radius, Minimum       | 4.50 t    | 4.50 t                   | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet  |
| Beta Transus               | 1040 °C   | 1900 °F                  |                                    |



ПРИЛОЖЕНИЕ 49

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 829 (TI-5.5AL-3.5SN-3ZR-1NB-0.25MO-0.3SI) TITANIUM ALLOY**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 5.2-5.7; C; Max 0.08; Nb; 0.7-1.3; H; Max 0.006; Mo; 0.2-0.35; N; Max 0.03; O; 0.09-0.15; Si; 0.02-0.05; Sn; 3-4; Zr; 2.5-3.5; Ti; 84.2-88.1

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. Weldable, High Strength, High Temperature, Creep Resistant Alloy. Typical heat treatment for this alloy: Solution heat treat:

1050°C for 30 mins, air cool. Aging heat treatment: 625°C for 2 hours, air cool.

Data provided by TIMET.

Features: TIMETAL 829 combines creep resistance up to 540°C with good oxidation resistance. It is weldable and like TIMETAL 685, TIMETAL 829 has good forgeability. It is nonmagnetic.

| Physical Properties              | Metric                                    | English                                      | Comments                             |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| Density                          | 4.51 g/cc                                 | 0.163 lb/in <sup>3</sup>                     | Typical                              |
| Tensile Strength, Ultimate       | 980 MPa                                   | 142000 psi                                   | Typical                              |
| Tensile Strength, Yield          | 860 MPa                                   | 125000 psi                                   | Typical 0.2% Proof Stress            |
| Elongation at Break              | 10.0 %                                    | 10.0 %                                       | Typical                              |
| Reduction of Area                | >= 15.0 %                                 | >= 15.0 %                                    |                                      |
| Modulus of Elasticity            | 120 GPa                                   | 17400 ksi                                    | Typical                              |
| Notched Tensile Strength         | >= 1488 MPa                               | >= 215800 psi                                | Kt=3                                 |
| Fatigue Strength                 | 775 MPa<br># of Cycles 100000             | 112000 psi<br># of Cycles 100000             | Forging with stress range 0-775 Mpa  |
|                                  | 1000 MPa<br># of Cycles 1000              | 145000 psi<br># of Cycles 1000               | Forging with stress range 0-1000 Mpa |
| Fracture Toughness               | >= 78.0 MPa-m <sup>1/2</sup>              | >= 71.0 ksi-in <sup>1/2</sup>                | K(IC)                                |
| CTE, linear 20°C                 | 9.45 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 200 °C | 5.25 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 392 °F  |                                      |
|                                  | 9.77 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 400 °C | 5.43 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 752 °F  |                                      |
|                                  | 9.98 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 600 °C | 5.54 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1110 °F |                                      |
| Thermal Conductivity             | 6.90 W/m-K                                | 47.9 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |                                      |
| Maximum Service Temperature, Air | 540 °C                                    | 1000 °F                                      | Good creep resistance                |
| Beta Transus                     | 1015 °C                                   | 1859 °F                                      |                                      |

ПРИЛОЖЕНИЕ 50

**СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА TIMET TIMETAL® 834 (Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C) TITANIUM ALLOY**

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 5.5-6.1; C; 0.04-0.08; Nb; 0.5-1.0; H; Max 0.006; Fe; Max 0.05; Mo; 0.25-0.75; N; Max 0.03; O; 0.075-0.15; Si; 0.02-0.06; Sn; 3-5; Zr; 3-5; Ti; 81.0-87.4

Material Notes: Titanium content above is calculated as the remainder and may not reflect the actual range. High-Strength, High Temperature, Creep Resistant Alloy. Industry Specifications: France: T-A6EZ r4Nb. Typical heat treatment for this alloy: Solution heat treatment: 1015°C for 2 hours, oil quench. Aging heat treatment: 700°C for 2 hours, air cool. Data provided by TIMET.

Features: TIMETAL 834 is a near alpha titanium alloy offering increased tensile strength and creep resistance up to 600°C together with improved fatigue strength when compared with established creep resistant alloys such as TIMETAL 6-2-4-2, TIMETAL 829 and TIMETAL 685. Like these alloys, it is weldable and has good forgeability. Major uses for TIMETAL 834 include rings, compressor discs and blades for aeroengines. It is nonmagnetic.

| Physical Properties              | Metric                                    | English                                      | Comments                                   |
|----------------------------------|---|--|--|
| Density                          | 4.55 g/cc                                 | 0.164 lb/in <sup>3</sup>                     | Typical                                    |
| Tensile Strength, Ultimate       | 1050 MPa                                  | 152000 psi                                   | Typical                                    |
| Tensile Strength, Yield          | 930 MPa                                   | 135000 psi                                   | Typical 0.2% Proof Stress                  |
| Elongation at Break              | 11.0 %                                    | 11.0 %                                       | Typical                                    |
| Reduction of Area                | >= 15.0 %                                 | >= 15.0 %                                    |  |
| Modulus of Elasticity            | 120 GPa                                   | 17400 ksi                                    | Typical                                    |
| Notched Tensile Strength         | >= 1493 MPa                               | >= 216500 psi                                | Kt=3                                       |
| Fatigue Strength                 | 350 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 50800 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | Notched; Kt = 2; stress range 0 to 350 Mpa |
|                                  | 560 MPa<br># of Cycles 1.00e+7            | 81200 psi<br># of Cycles 1.00e+7             | unnotched, stress range 0 to 560 Mpa       |
| Fracture Toughness               | >= 45.0 MPa-m <sup>1/2</sup>              | >= 41.0 ksi-in <sup>1/2</sup>                | K(IC)                                      |
| Bend Radius, Minimum             | 6.00 t                                    | 6.00 t                                       | Typical; on 0.078 in (2 mm) sheet          |
| Thermal Properties               | Metric                                    | English                                      | Comments                                   |
| CTE, linear 20°C                 | 10.6 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 200 °C | 5.89 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 392 °F  |  |
|                                  | 10.9 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 400 °C | 6.06 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 752 °F  |  |
|                                  | 10.9 µm/m-°C<br>Temperature 20.0 - 600 °C | 6.06 µin/in-°F<br>Temperature 68.0 - 1110 °F |  |
| Thermal Conductivity             | 7.06 W/m-K                                | 49.0 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F           |  |
| Maximum Service Temperature, Air | 600 °C                                    | 1110 °F                                      | Good tensile and creep to 600°C            |
| Beta Transus                     | 1045 °C                                   | 1913 °F                                      |  |

ПРИЛОЖЕНИЕ 51

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА UNIVERSAL WIRE WORKS 5AL-  
2.5SN (AMS 4953) TITANIUM ALLOY FILLER METAL

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; Max 5.75; C; Max 0.08; H; Max 0.015; Fe; Max 0.5; N; Max 0.05; O; Max 0.175; Sn; Max 3; Ti; Min 90.43

Material Notes: Titanium content is calculated as remainder. Universal Ti 5Al-2.5Sn titanium alloy is easily joined with the gas tungsten arc, gas metal arc or resistance welding processes. 100% joint efficiency can be obtained provided proper shielding procedures are used. Alloy 4953 is often employed for applications where weldability and oxidation resistance is of major interest. Good high temperature strength and stability are trademarks of this alloy. Information provided by Universal Wire Works for their line of welding wire and filler metal.

| Physical Properties        | Metric  | English    | Comments              |
|----------------------------|---------|------------|-----------------------|
| Tensile Strength, Ultimate | 827 MPa | 120000 psi | Annealed              |
| Tensile Strength, Yield    | 793 MPa | 115000 psi | Annealed, 0.2% offset |
| Elongation at Break        | 10.0 %  | 10.0 %     | Annealed              |

ПРИЛОЖЕНИЕ 52

СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА UNIVERSAL WIRE WORKS 8AL-  
1MO-1V (AMS 4955) TITANIUM ALLOY FILLER METAL

Ниже приведены данные, представленные на сайте <http://www.matweb.com>, который разработан и поддерживается Automation Creation, Inc.

Components; Wt. %; Al; 8; C; Max 0.08; H; Max 0.01; Fe; Max 0.3; Mo; 1; N; Max 0.05; Other; Max 0.4; O; Max 0.12; V; Max 1; Ti; Min 89.04

Material Notes: Titanium content is calculated as remainder. Titanium alloy 8Al-1Mo-1V filler metal is for gas-metal-arc and gas tungsten arc welding of base metals of similar analysis. Information provided by Universal Wire Works for their line of welding wire and filler metal.

*Учебное издание*

**Логинов** Юрий Николаевич

**Котов** Вячеслав Валерьевич

Проявления анизотропии в процессах деформации  
альфа-сплавов титана

Редактор *О.С.Смирнова*

---

|                     |                |              |            |
|---------------------|----------------|--------------|------------|
| Подписано в печать  | 02.10.2009     | Формат       | 60x84 1/16 |
| Бумага типографская | Плоская печать | Усл. печ. л. | 10,93      |
| Уч.-изд. л.         | 11,0           | Тираж        | 100 экз    |
|                     |                | Заказ        | 429        |

---

Редакционно-издательский отдел УГТУ-УПИ  
620002, Екатеринбург, Мира, 19  
rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ,  
620002, Екатеринбург, Мира, 19